



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut
Maaehituse osakond

Joosep Tohvri

**VASTUPANU MIKROPUURIMISE SEOS OKASPUIDU TIHEDUSE JA
RISTIKIUDU SURVEPINGEGA**

RELATION AMONGST RESISTANCE MICRO-DRILLING TO DENSITY AND
COMPRESSION STRESSES PERPENDICULAR TO THE GRAIN OF SOFTWOOD

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Marko Teder *PhD*

Tartu 2017



Eesti Maaülikool Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Magistritöö lühikokkuvõte	
Autor: Joosep Tohvri		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Vastupanu mikropuurimise seos okaspuidu tiheduse ja ristikiudu survepingega			
Lehekülgi: 67	Jooniseid: 34	Tabeleid: 5	Lisasid: 6
Osakond:		Maaehituse osakond	
Uurimisvaldkond:		Puidu füüsilised ja mehaanilised omadused	
Juhendaja:		Marko Teder	
Kaitsmiskoht ja aasta:		Tartu, 2017	
<p>Restaureerimise ja rekonstrueerimise vallas on puitkonstruktsioonide <i>in situ</i> hindamisel oluline osa. Lisaks visuaalsele hindamisele on üha enam kasutusele võetud seadmeid, mis võimaldavad kergemalt ja täpsemalt hinnata mittepurustavalt puitkonstruktsioonide füüsilisi ja mehaanilisi omadusi. Käesoleva töö eesmärk oli uurida vastupanu mikropuurimise mõõtetulemuste sõltuvust ristikiudu survepingega okaspuidus.</p> <p>Magistriöös uuriti harilikust kuusest (<i>Picea abies</i>) ja harilikust männist (<i>Pinus sylvestris</i>) valmistatud katsekehasid. Esmalt puuriti proovikehasid resistograafia koormuseta olukorras ning seejärel koormuseid järk-järgult tõstes. Maksimaalne ristikiudu surve koormus männist katsekehadel oli 9 kN ning kuuse puhul 7,5 kN. Saadud tulemustele teostati statistiline andmetöötlus.</p> <p>Leiti, et konstruktsioonis kasutamata männist ja kuusest katsekehade ristikiudu survepinge ja resistograafi mõõtetulemuse vahel oli keskmine positiivne korrelatsioon ($R^2=0,42$, $R^2=0,44$). Konstruktsioonis kasutatud kuuse puhul oli vastav näitaja tugev ($R^2=0,78$). Lineaarne korrelatsioon resistograafi näidu ja ristikiudu koormuse männist katsekehade puhul oli tugev ($R^2=0,71$), uuest ja vanast kuusepuidust katsekehade vastavad suurused olid marginaalsed ($R^2=0,0027$, $R^2=0,12$). Tiheduse ja resistograafiliste mõõtmise vaheline seos oli kõigil juhtudel tugev ($R^2=0,53...0,69$).</p>			
Märksõnad: tihedus, vastupanu mikropuurimine, ristikiudu survepinge			



Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master´s Thesis	
Author: Joosep Tohvri		Specialty: Rural Engineering	
Title: Relation amongst resistance micro-drilling to density and compression stresses perpendicular to the grain of softwood			
Pages: 67	Figures: 34	Tables: 5	Appendixes: 6
Department:		Institute of Forestry and Rural Engineering	
Field of research:		Physical and mechanical properties of wood	
Supervisor:		Marko Teder	
Place and date:		Tartu, 2017	
<p>In situ assessment of wooden structures plays an important role in the fields of restoration and reconstruction. In addition to visual assessment, devices for more precise evaluation of the physical and mechanical properties of wooden structures have been taken into use. The aim of this thesis is to measure correlation between resistance micro-drilling and compression stresses perpendicular to the grain in softwood.</p> <p>Test pieces of common spruce (<i>Picea abies</i>) and common pine (<i>Pinus sylvestris</i>) were studied in this master's thesis. In the beginning the test pieces were drilled with a resistograph in an unloaded situation and then the load was increased step by step. The maximal load for compression stresses perpendicular to the grain was 9 kN for the pine wood pieces and 7,5 kN for the spruce wood pieces. The results were analyzed with methods of statistical data processing.</p> <p>It was found that the correlation was strong for spruce wood test pieces used in the structure ($R^2=0,78$). Linear correlation between the reading of the resistograph and compression load perpendicular to the grain of pine wood test pieces was also strong ($R^2=0,71$); corresponding correlations between new and old spruce wood were marginal ($R^2=0,0027$; $R^2=0,12$). The correlation between density and resistographical measurements was strong in all cases ($R^2=0,53...0,69$).</p>			
Keywords: density, resistance drilling, compression stresses perpendicular to the grain			

SISUKORD

Sissejuhatus	6
1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST	8
1.1. Puidu ehitus.....	8
1.1.1. Puidu makroskoopilised tunnused	8
1.1.2. Puidu mikroskoopilised tunnused.....	8
1.2. Puidu füüsikalised omadused.....	9
1.2.1. Tihedus	9
1.2.2. Niiskus	9
1.3. Puidu mehaanilised omadused.....	10
1.3.1. Puidu tugevus	10
1.3.2. Puidu survetugevus ristikiudu	10
1.4. Puidu kahjustused ja rikked	12
1.5. Varasemalt tehtud uuringud.....	13
1.5.1. Vastupanu mikropuurimine ja puidu survetugevus	13
1.5.2. Vastupanu mikropuurimine ja puidu tihedus.....	15
1.6. Resistograafia mõõtmismeetod ja tööpõhimõtted.....	20
1.6.1. Resistograaf	20
1.6.2. Vastupanu mikropuuri (resistograafi) kasutusotstarve ja tööpõhimõte	20
1.6.3. Resistograafi mõõtetulemusi mõjutavad tegurid	21
2. UURIMISMATERJAL JA METOODIKA.....	22
2.1. Uuritav materjal	22
2.2. Katsekehade valmistamine.....	22
2.3. Katsekehade mõõtmine	23
2.4. Katsekehade niiskuse mõõtmine.....	25
2.5. Katsetamine	25
2.5.1. Koormuste määramine.....	25
2.5.2. Vastupanu mikropuurimine	26
2.6. Statistiline andmetöötlus.....	28

3. TULEMUSED JA ARUTELU	30
3.1. Uuritav materjal	30
3.2. Niiskus	30
3.3. Vastupanu mikropuurimise korrelatsioon ristikiudu surve ja survepingega.....	30
3.3.1. Harilik mänd	30
3.3.2. Tugevussorteeritud harilik kuusk	35
3.3.3. Konstruktsioonis kasutusel olnud harilik kuusk	40
3.3.4. Vastupanu mikropuurimine ristikiudu surve all – üldised järeldused	46
3.4. Vastupanu mikropuurimise korrelatsioon puidu tihedusega.....	46
3.4.1. Harilik mänd	46
3.4.2. Konstruktsioonis kasutamata harilik kuusk	47
3.4.3. Konstruktsioonis kasutusel olnud harilik kuusk	48
3.4.4. Vastupanu mikropuurimise ja tiheduse vahelise seose mõõtmise üldised probleemid	49
KOKKUVÕTE	50
KASUTATUD KIRJANDUS	52
SUMMARY	55
LISAD	57
Lisa 1. Männipuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks.....	58
Lisa 2. Tugevussorteeritud konstruktsioonis kasutamata kuusepuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks	59
Lisa 3. Konstruktsioonis kasutusel olnud kuusepuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks	60
Lisa 4. Männipuidust katsekehade resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline regressioonanalüüs	61
Lisa 5. Tugevussorteeritud konstruktsioonis kasutamata kuusepuidust katsekehade resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline regressioonanalüüs	63
Lisa 6. Konstruktsioonis kasutusel olnud kuusepuidust katsekehade resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline regressioonanalüüs	65
Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	67

SISSEJUHATUS

Puitu kui ehitusmaterjali on kasutatud juba tuhandeid aastaid. Puidu eelised teiste materjalide ees on tema kättesaadavus ehk lai levik, suhteliselt kerge kaal ning sellele vastav tugevus. Lisaks on oluline puidu kasutamise juures tema töötlemise hõlpsus. Negatiivsena võib välja tuua puidu mittehomogeensuse ja vastuvõtlikkuse biokahjustustele. Just bioloogiliste kahjustuste tõttu on tarvis vanade puitkonstruktsioonide seisukorda kontrollida. Sageli on auditeeritavad hooned muinsuskaitse all ning konstruktsiooni osade otsene ehk laboratoorselt purustaval meetodil kontrollimine välistatud. Seetõttu on välja töötatud mitmeid mittepurustaval meetodil töötavaid seadmeid, millega on võimalik hinnata olemasolevate puitkonstruktsioonide mehaanilisi ja füüsilisi omadusi *in situ* ehk kohapeal, hoonet ja selle osasid kahjustamata. Üheks selliseks seadmeks on F. Rinni poolt välja töötatud resistograaf ehk vastupanu mikropuurismisseade, millega erinevate allikate kohaselt on võimalik hinnata puidu tihedust ning määrata rikkeid ja nende ulatusi.

Selleks, et hinnata vanade puitkonstruktsioonide ohutust tuleb määrata puidu tegelikud mehaanilised omadused. See on esimene samm tehnilise seisukorra hindamiseks ja võimalike rekonstrueerimise variantide väljatöötamiseks. Puidu mehaaniliste omaduste määramisel *in situ*, eriti ajalooliste hoonete kandvate elementide puhul, on üheks kriteeriumiks mitte kahjustada konstruktsioone ega selle osasid. Resistograafilised uuringud võimaldavad hinnata puidus olevate kahjustuste ulatust konstruktsioone kahjustamata. (Piazza & Riggio, 2008)

Läbi sajandite on puitu kasutatud hoonetes konstruktsioonimaterjalina. Ka tänapäeval on veel alles palju vanu puitkonstruktsioone täitmas oma ülesannet, näidates selle materjali efektiivsust. Kuna puit on orgaaniline materjal võivad seda kahjustada erinevad biotilised ja abiotilised tegurid, mis võivad puitu nõrgestada. See aga on jätnud puidu kui ehitusmaterjali kohta vanamoelise ja ebaefektiivse mulje. Õnneks on viimastel aastatel hakatud kultuuripäranditest rohkem lugu pidama ning ehitiste konserveerimine ja restaureerimine on taas päevakorda kerkinud. Selleks, et hinnata olemasolevate konstruktsioonide seisukorda objektil, seda kahjustamata, on arendatud erinevaid seadmeid. Puidu tiheduse ja kahjustuste hindamiseks *in situ* on resistograaf väga usaldusväärne. (Acuna, et al., 2011)

Vastupanu mikropuurimisseade Resistograph arendati eesmärgiga luua täpne ja kergesti kasutatav seade avastamiseks puidu defekte. Seadme tööpõhimõte seisneb elektroonilisel seadmel, mis mõõdab kui palju vastupanu puit osutab konstantsel kiirusel liikuvale puurile. Mõõtetulemused salvestatakse seadme mälusse. (Rinn, Schweingruber, & Schär, 1996)

Puidu tihedus on oluline füüsikaline suurus kuna on tugevas korrelatsioonis saepuidu tugevuse, elastsusmooduli, paindetugevuse ning survetugevusega piki- ja ristikiudu. (Haygreen & Bowyer, 1996)

Käesoleva töö eesmärgiks oli uurida, kas vastupanu mikropuurimise mõõtetulemused on sõltuvad okaspuidu ristikiudu survepingetest ning kas ristikiudu koormused avaldavad resistograafi mõõtmistele mõju. Veel uuriti Eestis kasvanud puidu tiheduse seost resistograafi mõõtmistega. Töö ühe osana võrreldi konstruktsioonis kasutusel olnud ehk vana puidu ja konstruktsioonis kasutusel mitte olnud ehk uue puidu resistograafiliste mõõtmiste erinevusi. Eesmärk oli leida, kas ja kui palju on vastupanu mikropuurimise mõõtetulemused sõltuvad sellest, kas puitu on varem kasutatud või mitte kuna enamjaolt uuritakse resistograafiga vanu konstruktsioone.

Töö esimeses osas kirjeldatakse puidu ehitust ning antakse ülevaade okaspuidu füüsikalistest ja mehaanilistest omadustest. Esimene osa hõlmab endas lisaks kirjanduse ülevaadet, mis kirjeldab varasemalt tehtud uuringuid. Teises osas kirjeldatakse uuritavat materjali, katsete käiku ning statistilist andmetöötlust. Töö kolmandas peatükis tuuakse välja katsete tulemused, andmestiku analüüs ja järeldused.

Autor tänab Eesti Maaülikooli Metsandus- ja Maaehitusinstituudi Metsatööstuse osakonna dotsenti Regino Kaske, kes juhendas katseseadmega Instron töötamisel. Samuti tänab autor AS Rait Raitwood tartu osakonda, katseteks vajaliku puidu eest ning juhendajat Marko Tederit abivalmi ja professionaalse juhendamise eest magistritöö koostamisel.

1. ÜLEVAADE KIRJANDUSEST

1.1. Puidu ehitus

1.1.1. Puidu makroskoopilised tunnused

Hariliku kuuse (*Picea Abies*) makroskoopilisteks põhitunnusteks on aastarõngaste hea eristatavus ning kevad- ja sügispuidu selgepiirilisus. Puidu säskiired ei ole nähtavad üheski lõikes. Kuuse värvus on kogu ristlõikes ühesugune ning malts- ja lülipuit on väga raskesti eristatav ning seetõttu nimetatakse kuuske küspuiduliseks. Vaigukäike on puidus võrdlemisi vähe ning on suuruselt väga väikesed. Puit on suhteliselt pehme ja kergesti lõhestatav. (Veermets, 1962)

Hariliku männi (*Pinus Sylvestris*) põhitunnusteks on malts- ja lülipuidu selge eristatavus. Toore puidu puhul see erisus välja ei paista. Puidu ristlõike siseosa on tumedam lülipuit ning seda ümbritseb heledam maltspuit. Männi aastarõngad on selgepiirilised ning heledam kevadpuit ja tumedam sügispuit on hästi eristatavad. Vaigukäigud on suuremad ning neid esineb suhteliselt arvukalt. Puit on keskmise kõvadusega ning hästi lõhestatav. (Veermets, 1962)

1.1.2. Puidu mikroskoopilised tunnused

Puidu anatoomilise ehituse iseärasusi on võimalik määrata küllaldase täpsusega mikroskoobi abil. Puit koosneb eri liiki rakkudest ja nende kogumikest. Okaspuidu peamiseks koostiseks on trahheiidid (90...95%). Trahheiidide põhiline ülesanne on anda puidule mehaaniline tugi ja juhtida toitelahuseid. Männi trahheidi keskmine pikkus on 2 kuni 3 millimeetrit ja kuusel 3 kuni 4 millimeetrit, laius on mõlemal puuliigil 0,02 kuni 0,04 millimeetrit. Maltspuiduosas on rakud suures jaos täidetud veega ja lülipuiduosas õhuga. Trahheide esineb puidus ca 1000...2000 tk ruutmillimeetril ning nende pikkus ja laius on tüves suurem kui kännuosas. (Saarman & Veibri, 2006)

Säskiirte rakkude peamine ülesanne on toitemahlade liigutamine tüve sisemusse ning nende säilitamine. Säskiirte rakud moodustavad säskiired. Okaspuu säskiired on kitsad ning luubita neid näha ei ole. (*Ibid.*)

Okaspuu puidus on ka veel parenhüümrakud, mis kujult kuubi- või prismataolised. Nende rakkude pikkus on 0,01...0,16 mm ja laius 0,002...0,050 mm. Puidu tugevuse seisukohalt ei oma need rakud olulist rolli küll aga sisaldavad need rakud antiseptilisi aineid, mis hoiavad puitu seenhaigustesse nakatumise eest. Parenhüümrakkude peamine eesmärk on puidus toitaineid salvestada. (Saarman & Veibri, 2006)

1.2. Puidu füüsikalised omadused

1.2.1. Tihedus

Tihedus on materjali massi ja mahu suhe ehk aine mahuühiku mass väljendatuna g/cm^3 või kg/m^3 . Puit on omadustelt poorne materjal, mille üldruumala sisaldab erinevas suuruses tühimikke. Kuna puit on hügrokoopne materjal, siis sisaldab ta vett. Puidu tiheduse määramisel tuleb kindlaks teha puidu niiskussisaldus. Suurema vee sisalduse korral on puit tihedam. (Saarman & Veibri, 2006)

Samuti sõltub puidu tihedus puidusubstanti sisaldusest, so. puiduaine mis koosneb tselluloosist ja ligniinist. Mida vähem on puidus poore ja õõnsusi seda tihedam puit on. Veel võib puidu tihedust mõjutada geograafiline päritolu, ümbruskonna füsioloogiline ja mehaaniline mõju aga ka vegetatsiooniperioodi pikkus ja sügispuidu osakaal aastarõngastes. (*Ibid.*)

Eriliikidest puidu tihedused on erinevad, kuid puitaine erimass on kõikidel liikidel praktiliselt ühesugune, keskmiselt $1,54 \text{ g/cm}^3$. Eri puiduliikide tihedusi saab võrrelda siis, kui need on määratud sama niiskussisalduse juures. Seetõttu on Euroopa Liidu standardites kokku lepitud mõõta puidutihedust 12% niiskussisalduse juures. (Just, Õiger, & Just, 2015)

1.2.2. Niiskus

Puidu absoluutset veesisaldust väljendatakse veehulgaga protsentides puidu kuivkaalust seosega. (Just, Õiger, & Just, 2015)

$$\omega = \frac{m_{\omega} - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad (1.1)$$

kus m_{ω} – puidust proovikeha mass enne kuivatamist,
 m_0 – puidu proovikeha mass pärast püsiva kaaluni kuivatamist.

Kasvavas puus võib niiskuse sisaldus olla vahemikus 30 kuni 200%. Maltspuidu niiskus on üldiselt kõrgem kui lülipuidul. Vesi sisaldub puidus rakuseintes hügrokoopse niiskusena ja kapillaarse niiskusena lumenites, soontes ja fibrillidevahelistes õõnsustes. Hügrokoopset niiskust sisaldub puidus vaid teatud piirini. Puidu rakuseinad imavad endasse niiskust kuni küllastuspunktini, mis on kõikidel puuliikidel ligikaudu 30%. (Wood handbook: Wood as an engineering material, 1974)

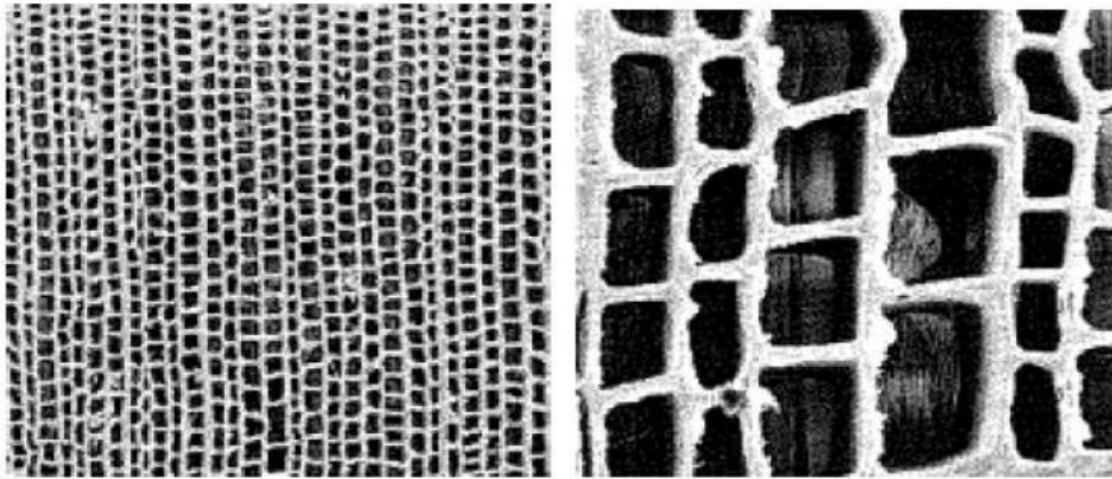
1.3. Puidu mehaanilised omadused

1.3.1. Puidu tugevus

Puit on looduslik materjal ning selle tõttu on puidu omadused suuresti varieeruvad. Sellest johtuvalt jaotatakse saematerjal erinevatesse tugevusklassidesse. Tugevus sõltub mitmetest parameetritest nagu puuliigist, tihedusest, okste suurusest ja arvust. Sellest lähtuvalt jaotatakse saematerjal tugevusklassidesse, kus on kirjeldatud puidu elastsusmoodul, painde- ja nihketugevus, surve- ja tõmbetugevus piki- ja ristikiudu ning tihedus. (Ali, Hussain, & Kamali, 2014)

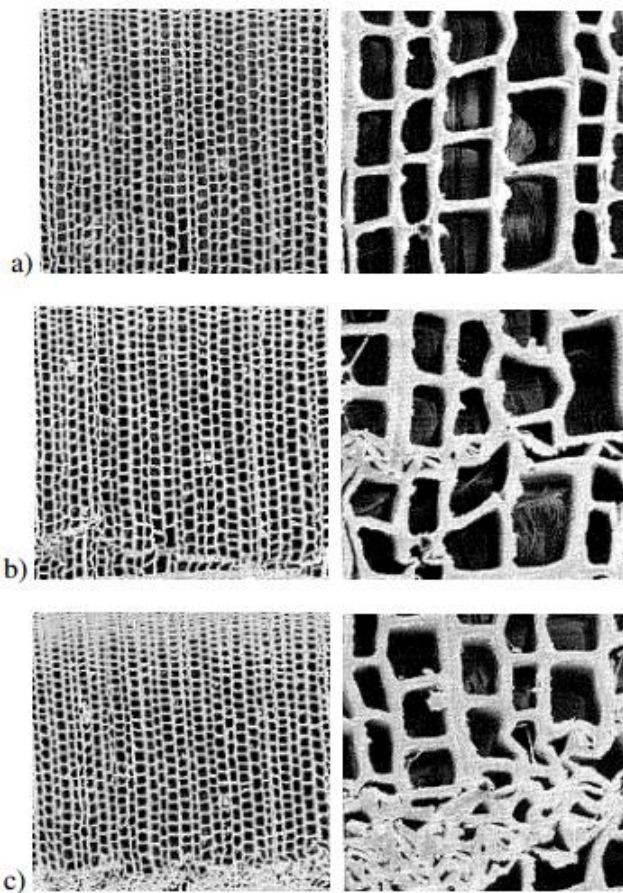
1.3.2. Puidu survetugevus ristikiudu

Ehituses on ristikiudu survetugevus oluline puidu omadus, kuna see on tunduvalt väiksem, kui pikikiudu survetugevus ning seetõttu on see konstruktsioonides oluline aspekt. Puit koosneb peentest torukujulistest rakkudest, mis on omavahel ühendatud ligniiniga (Joonis 1.1). (Ali, Hussain, & Kamali, 2014)



Joonis 1.1 Puidu mikroskoopiline ehitus (Persson, 2000)

Puidu ristikiudu koormamisel puidu torukujulised rakud satuvad külgsurve alla ning pressitakse koormuse kasvades kokku kuni kõik kiud on purustatud. Joonis 1.2 on näidatud, kuidas muutub puidu struktuur mikroskoopilisel tasandil ristikiudu survekatsel. (*Ibid.*)



Joonis 1.2 Puidu mikrostruktuuri deformatsioonid ristikiudu survekatsel a) deformeerumata b) keskmiselt deformeerunud c) tugevasti deformeerunud (Persson, 2000)

Kui kõik kiud on purustatud on võimalik uuesti tõsta survet ning seetõttu on raske määratleda lõplikku survetugevust. Ristikiudu survetugevuse määramiseks kasutatakse enamasti maksimaalset pinget. (*Ibid.*)

1.4. Puidu kahjustused ja rikked

Puitu võivad kahjustada mitmed füüsikalised tegurid nagu kuumus, kulumine, ultraviolettkiirgus ning erinevad kemikaalid. Enamasti vähendavad need tegurid puidu mehaanilisi omadusi aeglaselt. Suurimat riski kujutavad puidule siiski bioloogilised tegurid. (Just, Öiger, & Just, 2015)

Biokahjustus on igasugune ebasoovitav muutus materjali omadustes, mis on esile kutsutud organismide elutegevusega (Hueck, 2001).

Biokahjustused tekivad mitmesuguste organismide nagu bakterite, aktinomütseedide, mikroseente, putukate ja näriliste elutegevusest. Enamasti on sellised kahjustused keemilised või mehaanilised. Peamiseks biokahjustajaks puidus on seened. Sealjuures on kõige ohtlikumad puitu lagundavad seened, mille elutegevuse tagajärjel väheneb puidu kaal ja tihedus. Protsessi algstaadiumis on kahjustusi raske avastada isegi mikroskoobiga, kuid puidu tugevus võib olla juba oluliselt vähenenud. (Konsa & Pilt, 2013)

Teised väga olulised puidukahjurid on putukad. Puitu kahjustavad putukad võib jagada kolme gruppi: värsket puitu, kuiva puitu ja märgunud puitu eelistavad putukad. Putukakahjustused on enamasti mehaanilised. Putukakahjustustega puidu kasutamine konstruktsioonides on keelatud. (*Ibid.*)

Puidu rikked on teatud kõrvalekalded puidu normaalsest ehitusest. Levinumad rikked okaspuudel on ränipuit, mis on sügispuidu paikne muutus tüve ja okste surutud osas. Ränipuit on normaalsest puidust tumedam ja kõvem. Esineb ka tõrvaslaiksust ehk ebanormaalselt kõrget vaigusisaldust ja kaldkiulisust, mis on puidukiudude kõrvalekalle puutüve pikiteljest. Puidu kvaliteeti vähendavad ka lõhed. Lõhesid on kolme tüüpi: säsilõhe, mis kulgeb särist radiaalsuunas piki tüve, ringlõhe, mis kulgeb piki aastarõngaid ja kuivlõhe, mis tekib puidu kuivamisel. (Saarman & Veibri, 2006)

1.5. Varasemalt tehtud uuringud

1.5.1. Vastupanu mikropuurimine ja puidu survetugevus

R. Kruuda katsetas oma lõputöös konstruktsioonis kasutusel olnud kuuse- ja männipuitu. Töö eesmärgiks oli leida sõltuvusi resistograafi mõõtetulemuste ja survejõust tingitud pingete vahel. Katsekehad valmistati mõõtmetega 50x50x75mm. Määrati katsekehade tihedused ja veesisaldused. Seejärel puuriti katsekeha radiaalsuunas sellele survet avaldamata. Järgmisena avaldati katsekehale koormust 20 kN pikikiudu ning sooritati puurimine. Edasi suurendati survet 40 kN-ni ja teostati järgmine puurimine. Sedasi jätkati kuni koormus jõudis 100 kN-ni. Katsekehadele, mis ei purunenud 100 kN juures tehti purustav katse. Saadud tulemustele teostati statistiline andmetöötlus. Koostati korrelatsioonimaatriks erinevate tunnuste vahel. Statistilise andmetöötluse tulemusena leiti, et korrelatsioon puidu pikikiudu survepinge ja resistograafi näidu vahel on negatiivselt nõrk, olles vahemikus -0,25 kuni -0,32. Kuna seos on nõrk ei ole tarvis resistograafilisel uuringul arvestada puidu pikikiudu survepingetega. (Kruuda, 2010)

M. Kloiber uuris erinevate mittepurustavate meetodite ja standardi järgi tehtud survekatsetega saadud tulemuste sõltuvust. Katsekehad valmistati kolmest eri puuliigist: Harilik kuusk (*Picea abies*), hõbenulg (*Abies alba*) ja harilik mänd (*Pinus sylvestris*). Mittepurustavaid meetodeid katsetati 60 mm paksuste plankudega. Iga planku puuriti resistograafiga 72 korda. Purustaval meetodil puidu pikikiudu survetugevust mõõdeti standardi kohaselt 20x20x30mm katsekehadel ning kõvadust 50x50x50mm katsekehadel. Tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahel saadi tugev korrelatsioon nii kuuse kui ka männi korral, vastavalt $r^2=0,56$, $r^2=0,55$. Nulu puhul oli sama näitaja keskmine ($r^2=0,40$). Pikikiudu survetugevuse ja resistograafi näitude vahel oli korrelatsioon nõrgem, kuid siiski keskmine $r^2=0,3$ $r^2=0,3$ ja $r^2=0,4$, vastavalt kuusk, nulg ja mänd. Lisaks leiti, et resistograafi mõõtetulemuste ja puidu kõvaduse vaheline seos on keskmiselt tugev jäädes vahemikku 0,52...0,72. (Kloiber, Tippner, & Hrivnak, 2014)

B. Faggiano uuris konstruktsioonis kasutusel olnud harilikust kastanipuust (*Castanea sativa*) sõrestiku poste. Katsekehad pikikiudu survekatseks valmistati mõõtmetega 50x50x300mm ja mittepurustavatel meetoditega uurimiseks 50x50x150mm. Lisaks tehti paindekatsed täismõõtmetes konstruktsioonelementidele. Resistograafiga mõõtmisel puuriti katsekeha nii piki- kui ka ristikiudu. Andmete analüüsist selgus, et resistograafi mõõtetulemused on

sõltuvad puurimise suunast, tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vaheline seos on keskmiselt tugev ($r^2=0,51...0,55$), pikikiudu survetugevuse ja resistograafi tulemuste vaheline seos on samuti keskmiselt tugev ($r^2=0,50...0,54$). Ka paindetugevuse ja resistograafi tulemuste sõltuvus on keskmiselt tugev ($r^2=0,42...0,53$). Lisaks tõi autor välja, et mittepurustavad meetodid on head määramaks puidu mehaanilisi omadusi objektidel, eriti, kui tulemusi omavahel kombineerida. Lisaks on vaja lähemalt uurida ristikiudu survetugevuse ja mittepurustavate meetodite korrelatsioone. (Faggiano, Grippa, Marzo, & Mazzolani, 2011)

Y. Tsengi poolt tehtud uurimistöö eesmärk oli leida korrelatsioon puidu ristikiudu survetugevuse, tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahel. Katsekehad valmistati hiina nulust (*Cunninghamia lanceolata*) mõõtmatega 25x25x100mm, millest lõigati katsekeha mõõtmatega 25x25x25mm. Esmalt katsetati puidu ristikiudu survetugevust kolmes eri lõikes, aastarõngastega risti, aastarõngastega paralleelselt ning aastarõngastega 45 kraadise nurga all. Resistograafiga mõõtmiseks kastutati alles jäänud kehasid mõõtmatega 25x25x73mm. Puurimised teostati puidu kiudude suhtes 30, 45 ja 90 kraadise nurga all. Andmete analüüsidest selgus, et korrelatsioon puidu tiheduse ja resistograafi tulemuste vahel on tugev ($r^2=0,84$). Resistograafi mõõtetulemuste ja ristikiudu survetugevuse vaheline korrelatsioon on samuti tugev ($r^2=0,77$). Lisaks selgus, et resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline korrelatsioon ei sõltu puurimise ja puidu aastarõngaste vahelisest nurgast. (Tseng & Hsu, 2008)

Korrelatsioon vastupanu mikropuurimise ja puidu pikikiudu surve vahel on negatiivselt nõrk. See tähendab, et puidu vastupanu ei muutu oluliselt pikisuunalise surve all. (Teder, Pilt, Miljan, Lainurm, & Kruuda, 2012)

P. Lourenco uuris uue ja konstruktsioonis kasutatud kastanipuidu ristikiudu survetugevuse seoseid mittepurustavate meetoditega saadud mõõtetulemuste vahel. Katsekehad valmistati mõõtmatega 50x50x300mm. Seejärel teostati mõõtmised ultraheli seadmega. Järgmisena lõigati katsekehad mõõtmekeske 50x50x100mm. Kaks katsekeha igast esialgsest elemendist survestati pressi all purunemiseni kiirusel $6 \cdot 10^{-2}$ mm/s ning kolmandaid kehasid uuriti resistograafi ja Pilodyn 6J-ga. Määrati katsekehade veesisaldus ja tihedus. Nii uue kui ka konstruktsioonis kasutusel olnud puidu tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste graafikul on hajuvus liialt suur ning korrelatsiooni ei teki. Ristikiudu survetugevuse ja resistograafi mõõtmiste vahel on tugev lineaarne seos nii uuel kui ka kasutatud puidul, vastavalt $r^2=0,72$

ja $r^2=0,69$. Järeldusena leiti, et vanus ei mõjuta konstruktsioonipuidu omadusi, resistograafi mõõtetulemuste ja puidu tiheduse vahel puudub korrelatsioon. (Lourenco, Feio, & Machado, 2007)

1.5.2. Vastupanu mikropuurimine ja puidu tihedus

M. Teder leidis oma doktoritöös, et vastupanu mikropuurimise ja puidu tiheduse korrelatsioon on statistiliselt oluline. Regressioonianalüüsi tulemused varieerusid keskmisest tugevani ($r=0,57..085$). Seos on eriti tugev seen- ja putukkahjustustega puidu puhul. Korrelatsiooniväärtuste lai vahemik on põhjustatud laiast erinevate tihedustega valimist. (Teder, 2016)

C. Ceraldi teadustöö eesmärgiks oli uurida konstruktsioonis kasutusel olnud harilikust pöögist (*Fagus sylvatica*) ehituspuitu resistograafiga ning võrrelda saadud tulemusi puidu tiheduse ja pikikiudu survetugevusega. Tihedus ja pikisuunaline survetugevus määrati 235 katsekehal. Niiskusesisaldus oli vahemikus 11 kuni 12%. Resistograafiga puuriti konstruktsioonis kasutusel olnud talasid, mis pärast puurimist lõigati 25x25x50mm suurusel katsekehadeks, millel seejärel määrati tihedus. Andmestiku analüüsis jõuti tulemuseni, et tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahel on tugev korrelatsioon ($r^2=0,60$). (Ceraldi, Mormone, & Russo Ermolli, 2001)

M. Lainurm uuris oma magistratöös vana ehituspuidu erinevaid omadusi ja võrdles neid mittepurustaval katsetamisel saadud tulemustega. Töö eesmärk oli leida seoseid puidu füüsikaliste ja mehaaniliste omaduste ning nõelpüstoli ja resistograafi mõõtmistulemuste vahel. Katsetamiseks kasutati konstruktsioonides kasutatud ja uut kuuse- ja männipuitu. Katsekehad valmistati mõõtmega 50x50x1050mm. Katsekehadele teostati purustav paindekatse. Tiheduse määramiseks kasutati R. Kruuda 2010. aasta magistratöös saadud tulemusi materjali sama päritolu tõttu. Resistograafi mõõtetulemuste ja puidu tiheduse vahel tekkis statistiliselt oluline keskmise tugevusega korrelatsioon ($r=0,669$). See tähendab, et mida tihedam on puit seda suurem on resistograafi näit. Kuid teaduslike järelduste tegemiseks peab seost edasi uurima. (Lainurm, 2010)

F. Henriques uuris hariliku männi (*Pinus sylvestris*) ja merimänni (*Pinus pinaster*) omaduste ja resistograafi mõõtetulemuste sõltuvust. Katsekehad valmistati vigadeta uuest merimännist ning vigadeta konstruktsioonis kasutusel olnud harilikust männist. Katsekehade mõõtmed

olid 30x60x180mm. Tihedused mõõdeti kõigil 174 katsekehal, mis olid vahemikus 400...800 kg/m³. Iga katsekeha puuriti resistograafi kaks korda. Seejärel teostati katsekehadele purustav pikisuunaline survekatse. Saadud tulemustele tehtud andmestiku analüüsis leiti hea korrelatsioon puidu tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahel ($r^2=0,87$). Ka survetugevuse ja resistograafi mõõtetulemuste vahel leiti hea korrelatsioon ($r^2=0,70$). Resistograafi saab hinnata puidu keskmist tihedust kui viimase veesisaldus on teada ja on teada ka seadme karakteristikud. (Henriques, Nunes, Machado, & Brito, 2011)

A. O. Feio uurimustöö eesmärgiks oli leida seoseid mittepurustavatel meetoditel saadud mõõtetulemuste ja kastanipuidu mehaaniliste omaduste vahel. Katsekehad valmistati mõõtmatega 50x50x300mm. Seejärel teostati mõõtmised ultraheli seadmega. Järgmisena lõigati katsekehad mõõtmetsesse 50x50x100mm ja 50x50x200mm. Esimene keha kasutati mittepurustavatel meetoditel mõõtmiseks ning teisele tehti pikikiudu purustav survekatse. Määrati katsekehade veesisaldus ja tihedus. Andmestiku analüüsi käigus leiti keskmine lineaarne korrelatsioon puidu tiheduse ja resistograafi mõõtmiste vahel. Seejuures tulemused ei sõltu puidu vanusest. Kui ühendada vana ja uue puidu tulemused ühele graafikule tekib tugev lineaarne korrelatsioon ($r^2=0,81$). Pikikiudu survetugevuse ja resistograafi tulemuste vahel tekkis keskmine lineaarne korrelatsioon ($r^2=0,57$ ja $r^2=0,39$). (Feio, Lourenco, & Machado, 2007)

M. Piazza töö eesmärk oli visuaalselt ja mittepurustavatel meetoditel hinnata konstruktsioonipuidu omadusi. Katsekehadeks olid harilikust kuusest (*Picea abies*), euroopa lehisest (*Larix decidua*) ja harilikust kastanipuust (*Castanea sativa*) katsekonstruktsioonielemendid. Määrati elementide tihedused ja niiskusesisaldused. Seejärel puuriti katsekehasid resistograafi. Andmetele tehti regressioonanalüüs ning selgus, et resistograafi mõõtetulemuste ja puidu tiheduse vahel puudub seos ($r^2=0,039$). Autor tõi välja, et resistograafi adekvaatsete tulemuste saavutamiseks on tarvis uurida rohkemaid katsekehi ning uuritavas materjalis ei tohiks olla erinevaid lokaalseid kahjustusi nagu näiteks mädanik. (Piazza & Riggio, 2008)

L. Acuna uuringu eesmärgiks oli analüüsida resistograafi saadud mõõtetulemusi ning neid võrrelda puidu tihedusega. Katsekehad valmistati harilikust männist (*Pinus sylvestris*), mustast männist (*Pinus nigra Arnold*), merimännist (*Pinus pinaster*), harilikust kastanipuust (*Castanea sativa*) ning kreeka pähklipuust (*Juglans regia*) ja harilikust tammest (*quercus robur*) mõõtmatega 150x100x100mm. Katsekehasid puuriti resistograafi radiaalsuunas, et

puur läbiks aastarõngaid ristisuunaliselt. Resistograafi puur vahetati välja iga 50 puurimise järel. Kõigi puulikiide puhul oli korrelatsioon puidu tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahel tugev ($r^2 > 0,8$). Autor tõi töös välja, et resistograafiline testimine on väga lokaalne ning tulemusi ei tohiks kasutada üldistatult kogu konstruktsiooni hindamiseks. Lisaks toob autor välja, et resistograafiga saab väga täpselt määrata puidu tihedust ning R^2 väärtused üle 0,8 tagavad usaldusväärsuse. (Acuna, et al., 2011)

M. J. Morales Conde töö eesmärgiks oli leida võimalus hindamaks puidu tihedust resistograafi abil objektil. Katsekehadeks olid üle 200 aasta vanad männipuust vaivundamendi postid. Katsekehade tihedused määrati lokaalselt resistograafi puuraugu lähedalt. Selleks lõigati katsekehast välja 7mm diameetriga silindrikujuline katsekeha. Saadud korrelatsioon puidu tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahel oli tugev ($r^2 = 0,73$). Suurema katsekeha puhul oli korrelatsioon pisut madalam ($r^2 = 0,70$). Mida lokaalsemalt puidu tihedus määrata, seda suurem on korrelatsioon resistograafi mõõtetulemustega. (Morales Conde, Machado, & Rodriguez Linan, 2014)

H. C. Gantzi magistritöö eesmärk oli hinnata resistograafi tõhusust määramaks puidu tihedust. Katsekehad valmistati kahest okaspuu liigist, Kiirjas mänd (*Pinus radiata*) ja kariibi mänd (*Pinus caribaea*) ning kahest lehtpuu liigist, sinine eukalüpt (*Eucalyptus globulus*) ja *Eucalyptus urophylla* (eestikeelne vaste puudub). Resistograafiga puurimised teostati kasvavatel puudel. Seejärel võeti puursüdamik võimalikult puurimisauku ligidalt. Määrati tihedus ning toestati andmestiku analüüs. Kariibi männi puhul oli korrelatsioon puidu tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahel tugev ($r = 0,77$), kiirja männi puhul oli korrelatsioon madalam varieerudes vahemikus $r = 0,41 \dots 0,58$, sinise eukalüpti puhul oli sama näitaja samas suurusjärgus varieerudes vahemikus $r = 0,46 \dots 0,59$ ning *eucalyptus urophylla* puhul oli korrelatsioon keskmine kuni tugev ($r = 0,50 \dots 0,76$). Lisaks leidis autor, et resistograafiga mõõtes tuleb arvesse võtta ka puidu niiskusesisaldus. (Gantz, 2002)

Tabel 1.1 Varasemalt tehtud uuringute kokkuvõte

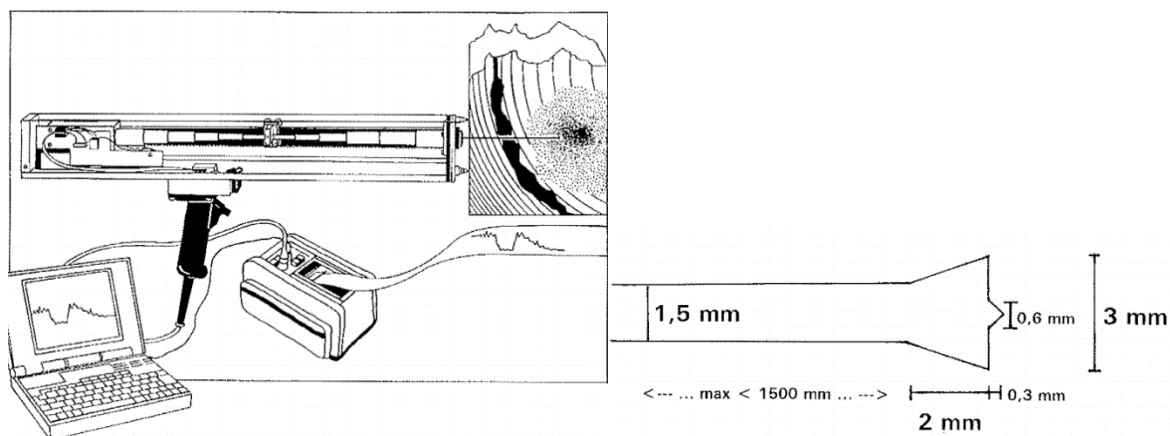
Autor	Puuliik	Korrelatsioon (RS- resistograafi näit)	r / r ²	Uus puit (U) / vana puit (V)
Kruuda	Harilik kuusk, harilik mänd	RS-tihedus	r ² = 0,37	
Kloiber et al	Harilik kuusk	RS – tihedus	r = 0.74	
		RS – pikisuunaline elastsusmoodul	r = 0.33	
		RS – ristisuunaline elastsusmoodul	r = 0.37	
		RS – pikikiudu survetugevus	r = 0.52	
		RS – ristikiudu survetugevus	r = 0.05	
	Hõbenulg	RS – tihedus	r = 0.65	
		RS – pikisuunaline elastsusmoodul	r = 0.14	
		RS – ristisuunaline elastsusmoodul	r = 0.01	
		RS – pikikiudu survetugevus	r = 0,59	
		RS – ristikiudu survetugevus	r = 0.08	
	Harilik mänd	RS – tihedus	r = 0.75	
		RS – pikisuunaline elastsusmoodul	r = 0.42	
		RS – ristisuunaline elastsusmoodul	r = 0.41	
		RS – pikikiudu survetugevus	r = 0.64	
		RS – ristikiudu survetugevus	r = 0.48	
Faggiano et al.	Harilik kastan	RS – tihedus	r ² = 0.51–0.55	
		RS – paindetugevus	r ² = 0.42–0.53	
Tseng & Hsu	Hiina nulg	RS – tihedus	r ² = 0.22–0.88	
		RS – ristisuunaline elastsusmoodul	r ² = 0.04–0.57	
		RS – ristikiudu survetugevus	r ² = 0.22–0.77	
Ceraldi et al.	Harilik pöök	RS – tihedus	r ² = 0.60	
Lainurm	Harilik kuusk, harilik mänd	RS – tihedus	r=0,67	
Henriques	Harilik mänd, Merimänd	RS - tihedus	r ² = 0.87	
		RS – pikikiudu survetugevus	r ² = 0.70	
Lourenço et al.	Harilik kastan	RS – ristisuunaline elastsusmoodul	r ² = 0.52–0.61 r ² = 0.56–0.67	U V

Autor	Puuliik	Korrelatsioon (RS- resistograafi näit)	r / r ²	Uus puit (U) / vana puit (V)
		RS – ristikiudu survetugevus	r ² = 0.47– 0.73 r ² = 0.63– 0.78	U V
Feio et al.	Harilik kastan	RS – tihedus	r ² = 0.71 r ² = 0.68	U V
		RS – pikisuunaline elastsusmoodul	r ² = 0.60 r ² = 0.64	U V
		RS – pikikiudu survetugevus	r ² = 0.59 r ² = 0.64	U V
Piazza & Riggio	Harilik kastan	RS – tihedus	r ² = 0.004	
Acuña et al.	Harilik mänd	RS – tihedus	r ² > 0.80	
	Must mänd			
	Merimänd			
	Harilik kastan			
	Kreeka pähklipuu			
	Harilik tamm			
Morales- Conde et al.	Harilik mänd	RS – tihedus	r ² = 0.70	
Gantz	Kiirjas mänd	RS – tihedus	r=0,41...0,58	
	Kariibi mänd		r=0,77	
	Sinine eukalüpt		r=0,46...0,59	
	<i>Eucalyptus urophylla</i>		r=0,50...0,76	

1.6. Resistograafia mõõtmismeetod ja tööpõhimõtted

1.6.1. Resistograaf

Resistograaf on elektrooniline vastupanu mikropuurimise seade, mis koosneb kahest mootorist, puuri teleskoopstabilisaatorist ning mikropuurist (Joonis 1.3). Puuri ja puuripea läbimõõdud on vastavalt 1,5 ja 3 mm (Joonis 1.3). Puuri energiaallikaks on aku, mille ühe laadimisega on võimalik sooritada kuni 100 puurimist. (Rinn, Rinntech, 2016)



Joonis 1.3 Resistograafi lõige ja puur (Rinn, Schweingruber, & Schär, 1996)

1.6.2. Vastupanu mikropuuri (resistograafi) kasutusotstarve ja tööpõhimõte

Seadme tööpõhimõte on mõõta, kui suurt jõudu on vaja rakendada, et puurida puitu konstantsel kiirusel. Resistograaf annab lugemi iga 1/10 või 1/100 millimeetri järel olenevalt seadmest. Puurida on võimalik kuni 1000mm/min ning seade võimaldab puurimise graafikut koheselt välja trükkida või salvestada tulemused arvutisse. (Rinn, Schweingruber, & Schär, 1996)

Mobiilseid vastupanu mikropuurimise seadmeid on eluspuude, puidu ja puitkonstruktsioonide uurimiseks kasutatud 1987. aastast alates. Vastupanu mikropuurimist kasutatakse, et uurida puitkonstruktsioonide tappe ja liiteid ning avastada neis mädanikke, lõhesid ning mardikakahjustusi. Seadmega töötamiseks on tarvis tunda puidu ehitust ning omadusi, et kasutada saadud mõõtetulemusi. (Rinn, 2012)

Seadme mõõtetulemuste ja puidu tiheduse vahel on tugev lineaarne korrelatsioon, mille abil saab määrata puidu kasvukiirust ja rikkeid. (Rinn, Rinntech, 2016)

1.6.3. Resistograafi mõõtetulemusi mõjutavad tegurid

Vastupanu mikropuurimine on korrelatsioonis tihedusega, mida kasutatakse puitkonstruktsioonide mehaaniliste omaduste määramiseks. Puurimisega on võimalik kaardistada kahjustuste ulatusi ja mõõtmeid. Meetod on hea erinevate puitkonstruktsioonide katsetamiseks mittepurustaval meetodil. Puurimist mõjutavad paljud tegurid nagu puidu niiskus, puuri teravus ja puurimisnurk. (Nowak, Jasienko, & Hamrol-Bielecka, 2016)

Sõltuvalt seadmest ja puuri tüübist võib puurimisel tekkinud puuraugu külghõõre tekitada valesid mõõtetulemusi. Paljudel juhtudel kui puidu tihedus ületab 600 kg/m^3 hakkab graafiku joon koos puurimissügavusega kasvama. See tendents muudab graafikud ja mõõtetulemused ebausaldusväärseteks. Selleks, et külghõõrdest tekkinud ebatäpsuseid vältida on tarvis kalibreeritud seadmeid koos tarkvaraga, et mõõtmised oleksid usaldusväärsed. (Tannert, et al., 2013)

Pehmete puiduliikide puhul ei ole külghõõre määrav kuna mõjutab mõõtetulemusi marginaalselt. Kuid väiksema läbimõõduga puuripea kasutamisel suureneb külghõõre märgatavalt ka pehmemate puuliikide puhul. (Nutto & Biechele, 2015)

C.-J. Lin katsetas kas ja kuidas mõjutab puidu niiskus vastupanu mikropuurimise tulemusi. Selleks valmistati katsekehad krüptomeerialaadsest taivaaniast (*Taiwania cryptomerioides*) mõõtmetega 20x10x180mm. Kokku valmistati 77 katsekeha. Puurimised teostati erinevatel puidu niiskusesisaldustel 11-st kuni 320%ni. Niiskuse sisalduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahel tekkis keskmine korrelatsioon ($r^2=0,31$), see tähendab, et mida suurema niiskusesisaldusega on puit seda suurem on resistograafi näit. (Lin, Wang, Lin, & Chiu, 2003)

Veesisalduse vähenedes resistograafi näit suureneb. Töös katsetatud puidu niiskusesisaldus oli vahemikus 5,45...12,88%. Resistograafiga saab üsna täpselt hinnata hilispuidu osakaalu ristlõikes, kuid esines ka puudusi seadme töös. Tulemused on sõltuvad puuri kinnitustugevusest, puuri teravusest ja külghõõrdest. (Lainurm, 2010)

2. UURIMISMATERJAL JA METOODIKA

2.1. Uuritav materjal

Töös kasutati kahte liiki puitu: harilikku mändi (*Pinus Sylvestris*) ja harilikku kuuske (*Picea Abies*). Kuusepuitu oli kaks sortimenti: värskelt saetud ja konstruktsioonis kasutatud puit.

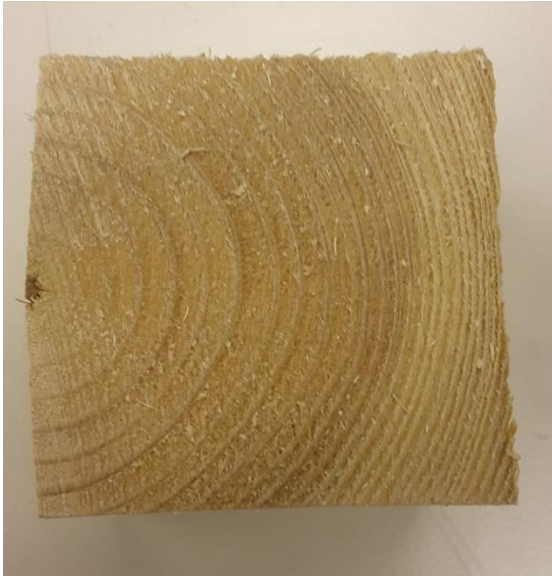
Konstruktsioonis kasutamata männipuit oli ristlõikega 50x100. Prussi valimisel oli määravaks säsi asukoht. Valiti materjal, mille säsi oleks ristlõike pikema külje serva keskkohas, et hiljem katesekehasid lõigates oleksid need radiaallõikega.

Konstruktsioonis kasutatud kuusepuit ristlõike mõõtmetega 50x100 mm on pärit Tartumaalt Tähtvere vallas Tiksojal asuvast Tartu metsamajandi tootmishoonest. Puit oli seal kasutusel roovitisena. (Nõmme, 2015)

Tugevussorteeritud kuusepuit on pärit magistritööst „Kuuse (*Picea Abies*) ja männi (*Pinus Sylvestris*) konstruktsioonipuidu tugevussorteerimine erinevate meetoditega“ kasutatud sortimendist. Katsekehad olid ristlõikelt mõõtmetega 50 x 100 mm ja 50 x 150 mm. Paindekatsega määratud tugevusklassid (EVS:338, 2016) kuusepuidu puhul varieerusid C30-st C45ni.. (Ütsik, 2015)

2.2. Katsekehade valmistamine

Kokku valmistati 100 katsekeha, neist 33 konstruktsioonis kasutusel olnud kuusepuidust, 34 tugevussorteeritud kuusest ning 33 männipuust saematerjalist. Katsekehasid lõigates jälgiti, et kõik lõiked oleksid radiaalsuunalised (Joonis 2.1).



Joonis 2.1 Katsekeha ristlõige

Uuritav materjal lõigati mõõtu Eesti Maaülikooli maaehitusosakonna labori saeruumis ketassael (Scheppach ts 310) ja järkamissaega (DeWalt).

2.3. Katsekehade mõõtmine

Selleks, et määrata katsekehade tihedus, mõõdeti kõik katsekehad tangentsiaal-, radiaal- ja pikisuunas. Mõõtmiseks kasutati digitaalset nihikut (Joonis 2.2), mille mõõtmistäpsus on $\pm 0,05$ millimeetrit. Seejärel kaaluti katsekehad digitaalse kaaluga, mille mõõtmistäpsuseks on $\pm 0,01$ grammi (Joonis 2.3).



Joonis 2.2 Digitaalne nihik



Joonis 2.3 Digitaalne kaal KERN PLB 1000-2

Saadud tulemused sisestati Microsoft Excel tabelarvutusprogrammi ning arvutati katsekehade ruumalad valemiga:

$$V=a*b*c \quad (2.1)$$

kus

a – katsekeha laius tangentsiaalsuunas;

b – katsekeha laius radiaalsuunas;

c – katsekeha pikkus;

Seejärel arvutati katsekehade tihedused valemiga (Saarman & Veibri, 2006):

$$r_{w,w}=m/V \quad (2.2)$$

kus

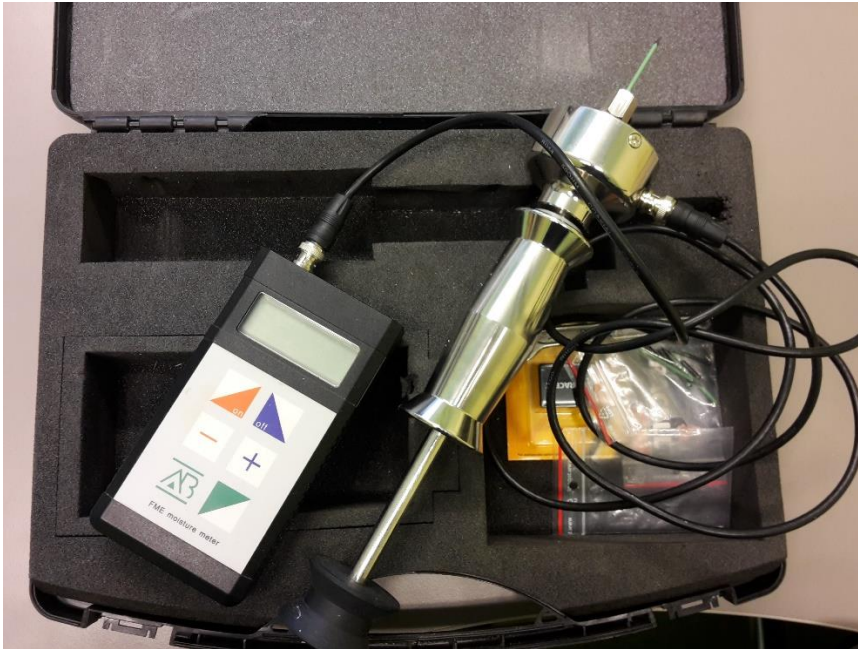
m – katsekeha mass niiskusega w%, kg;

V – katsekeha ruumala niiskusega w%, m³.

Kokku määrati tihedus 100 katsekehal.

2.4. Katsekehade niiskuse mõõtmine

Katsekehade niiskus määrati pisteliselt valitud katsekehadel. Niiskuse mõõtmiseks kasutati niiskusemõõtjat Absolute Moisture Meter FME (Joonis 2.4).



Joonis 2.4 Absolute Moisture Meter FME niiskusemõõtja

Vältimaks katsekehade deformeerimist mõõdeti niiskus pärast katsete läbiviimist.

2.5. Katsetamine

2.5.1. Koormuste määramine

Esmalt määrati proovikatsekehadega katsekehade ristikiudu survetugevus. Seejärel koostati koormamistsükli plaan, mis arvestab katsekehade survetugevust. See tähendab, et iga katsekeha koormatakse kolme erineva koormusega, koormust lineaarselt tõstes, sealjuures maksimaalne koormus ei olnud absoluutne maksimum, mida katsekeha suutis vastu võtta. Katsekehade deformatsioonid olid elastsed. Männipuidust katsekehade puhul algas koormustsükkel 3 kN juures ning lõppes 9 kN-ga. Kuusepuidust katsekehade koormustsükkel algas 2,5 kN-ga ja lõppes 7,5 kN-ga. Kuusest katsekehad ei olnud piisavalt tugevad, et võtta vastu 9kN suurust ristikiudu survet. Seetõttu oli kuusest katsekehade koormustsükli maksimaalne väärtus 7,5 kN.

2.5.2. Vastupanu mikropuurimine

Vastupanu mikropuurimisi teostati Rinntech-i seadmega Resistograph 4453-P. (vt Joonis 2.5)



Joonis 2.5 Vastupanu mikropuurimisseade Resistograph 4453-P kandekohvriga

Katseseadme tehnilised andmed on toodud Tabel 2.1.

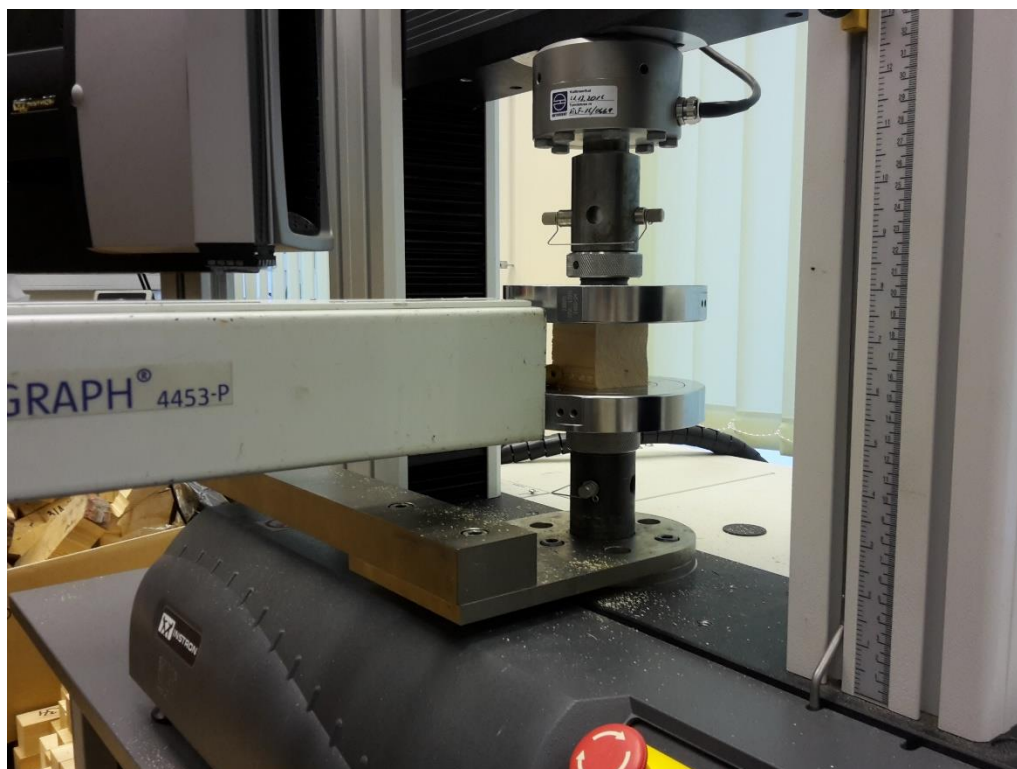
Tabel 2.1 Resistograph 4453-P tehnilised andmed

Tehnilised andmed	
Puuri läbimõõt	3mm
Puurimiskiirus	Kuni 40cm/min
Mõõte resolutsioon	1/10 mm
Seadme mälu	Kuni 500 puurimist
Aku	12V 320 Wh
Muud	Sisseehitatud termoprinter

Allikas: (Rinn, Rinntech, 2016)

Katsete eesmärgiks oli uurida vastupanu mikropuurimise tulemuste seoseid puidu ristikiudu survepingega. Selleks teostati esmalt katsekehale puurimine ilma koormuseta. Seejärel

puuriti katsekeha 3 kN ristikiudu surve all (vt Joonis 2.6). Järgnevad puurimised toimusid 6 kN ja 9 kN suuruste koormuste juures, koormust vahepeal maha võtmata.



Joonis 2.6 Katsekeha puurimine resistograafiga ristikiudu surve all

Katsekehade koormamine toimus kiirusega 4,5kN/min. Katsed teostati Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituudi puiduteaduste laboris surveseadmega Instron 3369 (vt Joonis 2.7).



Joonis 2.7 Survesead Instron 3369

Katsemasina juhtimine toimus läbi arvutiprogrammi Bluehill 2, mis võimaldas seadistada koormuste suuruseid ning koormamise kiiruseid.

2.6. Statistiline andmetöötlus

Kokku oli katsekehi 100. Iga katsekeha puuriti resistograafia neli korda. Kuna resistograaf tekitab iga puurimise kohta eraldi tabelarvutusprogrammi faili, tuli need esmalt koondada ühte Microsoft Excel faili. Resistograaf annab mõõtetulemuse iga 0,1 mm järel. Kuna puuri ots pole seadme otsikuga tasa, tekivad esimesed andmerekad juba enne puuri katsekehasse jõudmist ning need tuli andmestikust eemaldada. Samuti ei lõpeta seade automaatselt tulemuste registreerimist kohe pärast puuri katsekeha läbimist. Seetõttu tuli ka andmekogu lõpust mõõtetulemusi kustutada. Pärast andmete töötlemist jäi iga katsekeha kohta alles ca 500 rida mõõtetulemusi.

Pärast andmestiku esmast töötlemist arvutati iga katsekeha resistograafi mõõtetulemuste keskmine väärtus, mis kanti andmetabelisse, kuhu oli eelnevalt kantud katsekeha parameetrid ja ristikiudu survepinged erinevatel koormustel.

Survepinged arvutati valemiga:

$$\sigma = F / (a * b) \quad (2.3)$$

kus

F – katsekehale avaldatud jõud, kN;

a – katsekeha laius tangentsiaalsuunas;

b – katsekeha laius radiaalsuunas.

Analüüsis uuriti erinevate mõõtetulemuste ja parameetrite vahelisi seoseid. Seoste leidmiseks koostati korrelatsioonimaatriks. Korrelatsioon hinnati nõrgaks kui $r < 0,3$, keskmiseks kui $0,3 < r < 0,7$ ja tugevaks kui $r > 0,7$ (Kaart, 2010).

Lisaks analüüsiti resistograafi mõõtetulemuste muutumist protsentuaalselt koormuse kasvades. Selleks arvutati, kui palju erineb väiksema koormuse juures mõõdetud resistograafi tulemus suurema koormuse juures mõõdetud tulemusest. Saadud protsentidest leiti valimite kaupa keskmised.

Prognoosimaks resistograafi näitu tiheduse ja ristikiudu koormamisest tingitud survepingete alusel koostati võrrandid kasutades regressioonanalüüsi. Prognooside täpsuse hindamiseks kasutati determinatsioonikordajat R^2 . Korrelatsioonid ja prognoosid loeti statistiliselt oluliseks, kui (olulise tõenäosus) $p < 0,05$.

Statistiline andmestikuanalüüs teostati tabelarvutusprogrammis Microsoft Excel.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Uuritav materjal

Andmestiku analüüsi ja visuaalse hindamise käigus leiti, et 26-l katsekehal 100-st esines mingisugused kahjustused või rikked (oksad, lõhed, naelaaugud, mardikakahjustused ja vaigupesad). Kuna töö eesmärk ei olnud uurida defektide mõju resistograafi mõõtetulemustele, siis need katsekehad eemaldati valimist. Pärast defektsete katsekehade eemaldamist jäi valimisse 25 tugevussorteeritud kuusest, 25 konstruktsioonis kasutusel olnud kuusest ja 26 männist katsekeha.

3.2. Niiskus

Tugevussorteeritud ja konstruktsioonis kasutusel olnud kuusest katsekehade keskmine niiskussisaldus oli 6%. Männist katsekehade puhul oli sama näitaja keskmiselt 12%.

3.3. Vastupanu mikropuurimise korrelatsioon ristikiudu surve ja survepingega

3.3.1. Harilik mänd

Iga katsekeha puuriti neli korda. Esmalt puuriti katsekeha koormust avaldamata. Järgnevalt katsetati katsekehi koormuse all. Koormust avaldati katsekehadele nullist 9 kilonjuutonini. Koormustükkel koosnes kolmest osast, esmalt koormati keha 3 kN, siis 6 kN ja seejärel 9 kN jõuga.

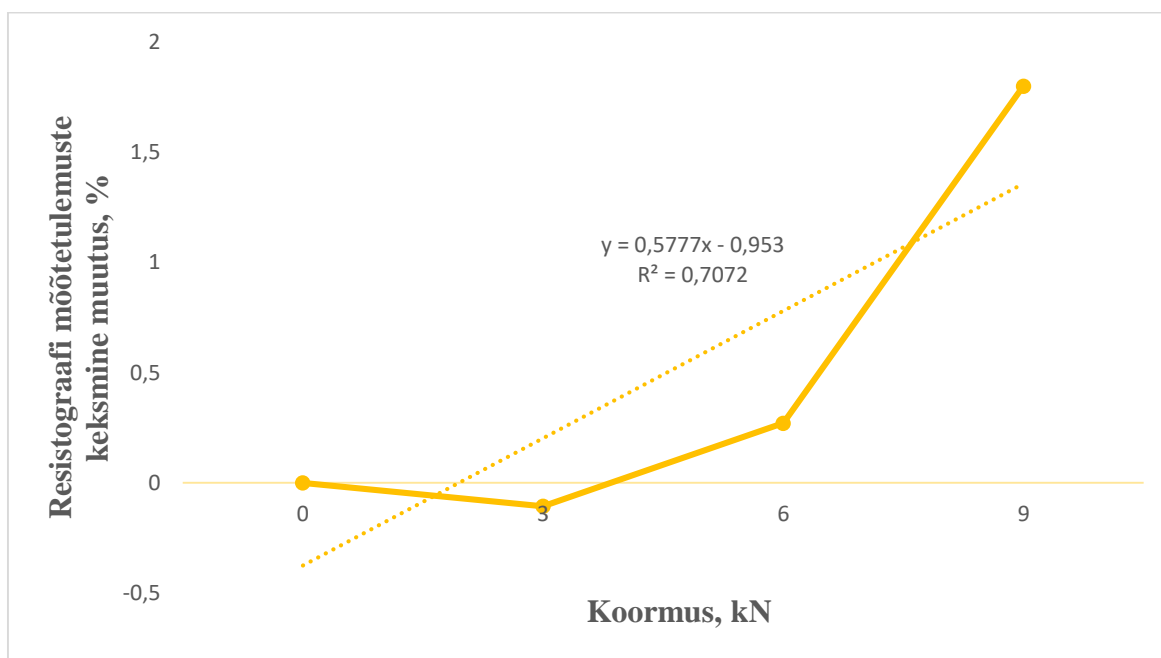
Katsekehale mõjuv ristikiudu koormus arvutati ümber survepingeks. Keskmised sisepinged ja resistograafi näidud erinevate koormuste juures koos standardhälvetega on esitatud Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Männist katsekehade keskmised ristikiudu survepinged ja resistograafi näidud erinevatel koormustel

	Koormus 0 kN	Koormus 3 kN	Koormus 6 kN	Koormus 9 kN
Keskmine ristikiudu survepinge (N/mm ²)	0	1,143±0,002	2,287±0,004	3,43±0,007
Keskmine resistograafi näit	118,83±0,727	118,71±0,699	119,06±0,817	121,2±0,877

Tabel 3.1 võib välja lugeda, et koormuse kasvades suureneb ka resistograafi mõõtetulemuste keskmine väärtust. Kuna koormuseta olukorras mõõdetud ja 3 kN koormuse all mõõdetud resistograafi tulemused ei erine oluliselt on alust arvata, et resistograafi mõõtetulemused ei sõltu olulisel määral koormusest. Kuid koormuse kasvades suureneb ka resistograafi näit üha kiiremini.

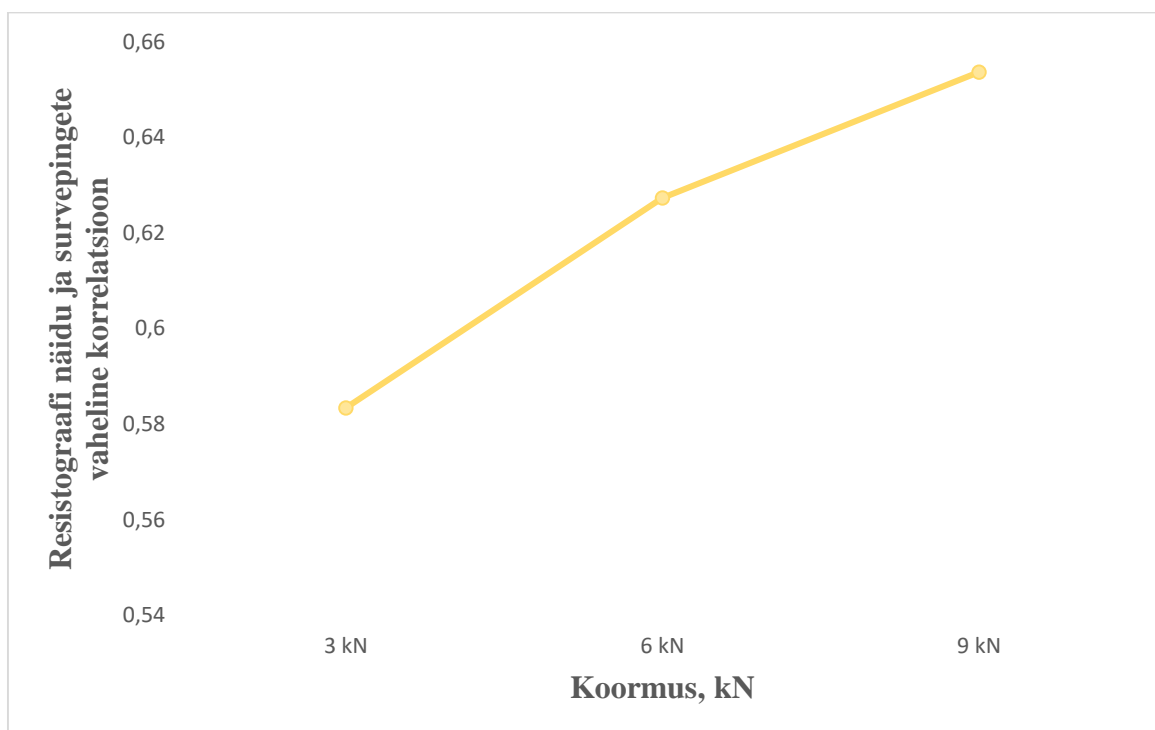
Seda, kuidas resistograafi mõõtetulemused muutuvad koormuse kasvades ilmestab Joonis 3.1.



Joonis 3.1 Resistograafi mõõtetulemuste keskmine protsentuaalne muutus koormuse suurendes

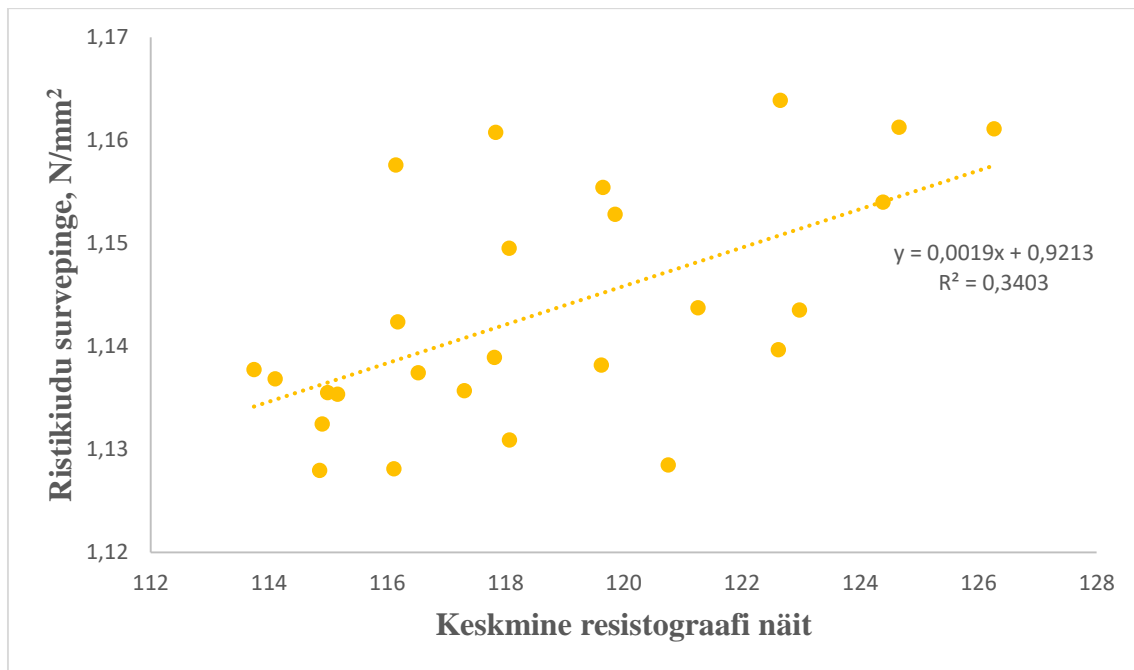
Analüüsi kohaselt väheneb männist katsekehade puhul resistograafi näit esimeses koormustsüklis, kuid suureneb järgmistel koormamistel. Mudeli usaldusväärsus on 70% ning selle kohaselt suureneb resistograafi näit 0,58% koormuse 1 kN võrra kasvades. Võrreldes teiste katsekehade gruppidega on see küllaltki usaldusväärne, kuid vajab teaduslike järelduste tegemiseks täiendavaid uuringuid.

Joonis 3.2 on näha, et ristikiudu survepinge ja resistograafi mõõtetulemuste vahel on keskmine seos jäädes vahemikku 0,58...0,65. Joonis on tehtud korrelatsioonianalüüs põhjal (Lisa 1), millest selgub, et koormuse kasvades sisepingete ja resistograafi mõõtetulemuste vaheline korrelatsioon suureneb vähesel määral.



Joonis 3.2 Resistograafi mõõtetulemuste ja ristikiudu survepingete vaheline korrelatsioon erinevates koormusolukordades

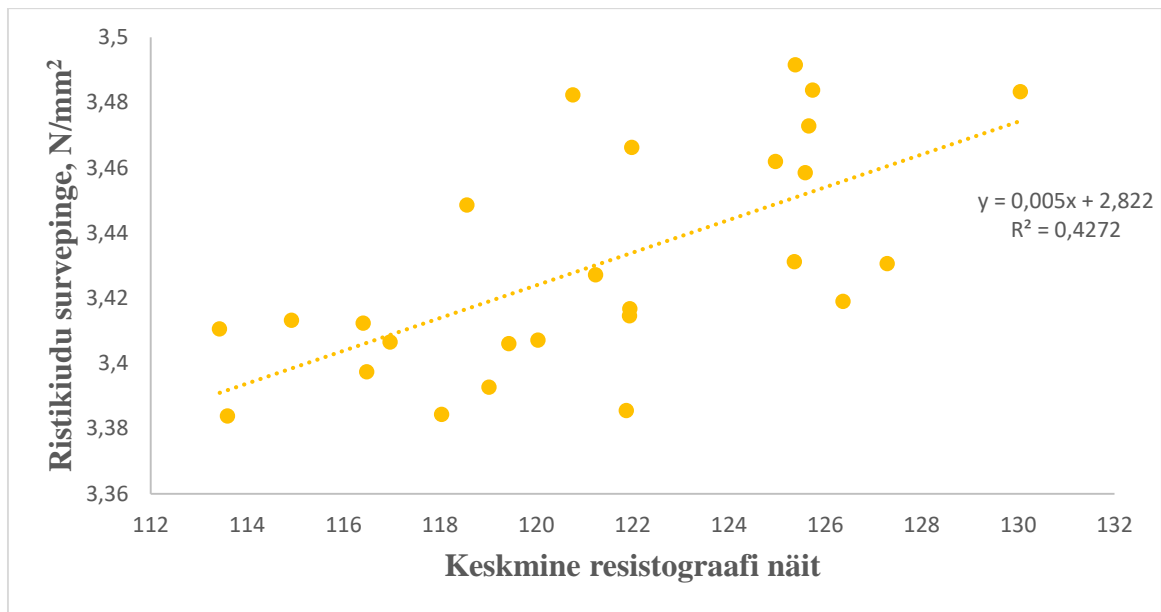
Kuna korrelatsioon on positiivne tähendab see seda, et koormuse kasvades suureneb ka resistograafi näit. Joonis 3.3Joonis 3.4 ja Joonis 3.5 on toodud graafikud, mis näitavad ristikiudu survepingete ja resistograafi mõõtetulemuste vahelisi seoseid. Joonised ilmestavad hästi, kuidas ristikiudu survepinge kasvades suureneb ka resistograafi mõõtetulemus.



Joonis 3.3 Ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vaheline seos 3 kN koormusel

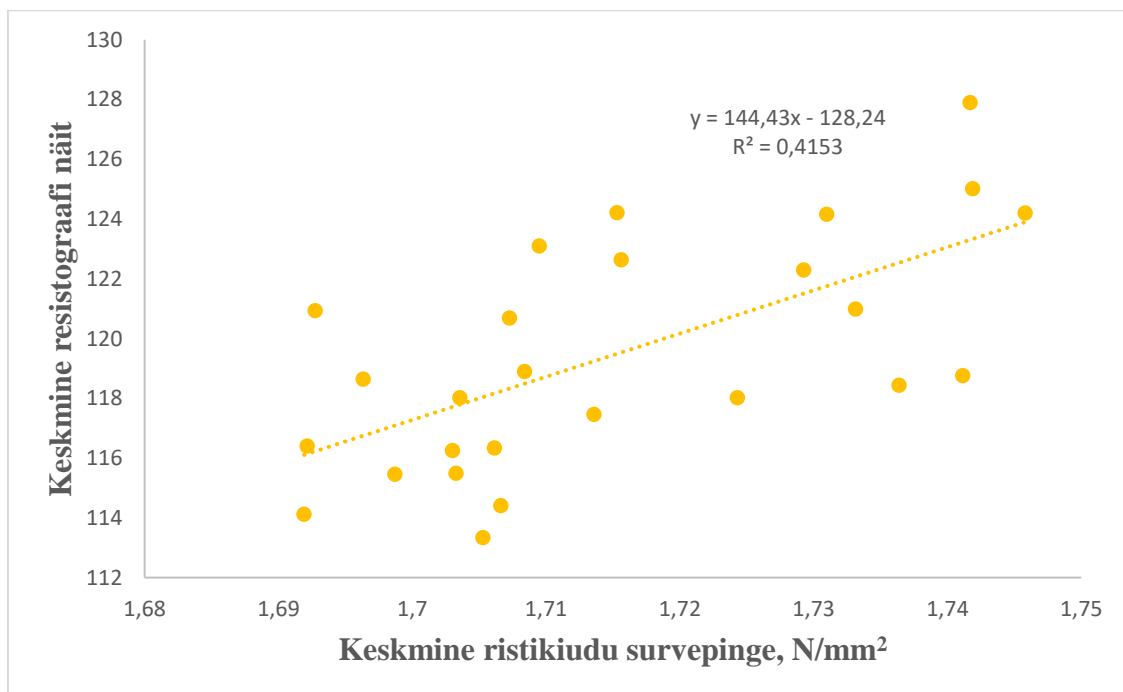


Joonis 3.4 Ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vaheline seos 6 kN koormusel



Joonis 3.5 Ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vaheline seos 9 kN koormusel

Joonis 3.6 on kujutatud keskmise ristikiudu survepinge ja keskmise resistograafi näidu vahelist seost. Mudeli kohaselt suureneb pinge 0,01 N/mm² võrra kasvades resistograafi näit 1,444 ühikut. Selle prognoosi usaldusväärsus on 41,5% ($R^2=0,4153$).



Joonis 3.6 Keskmise ristikiudu survepinge ja keskmise resistograafi näidu vaheline seos

Joonis 3.6 esitatud mudeli põhjal võib väita, et tunnused on üksteisest tugevas sõltuvuses, kuid teaduslikke järeldusi sellest teha ei saa, kuna kirjeldatuse aste on alla 50%.

3.3.2. Tugevussorteeritud harilik kuusk

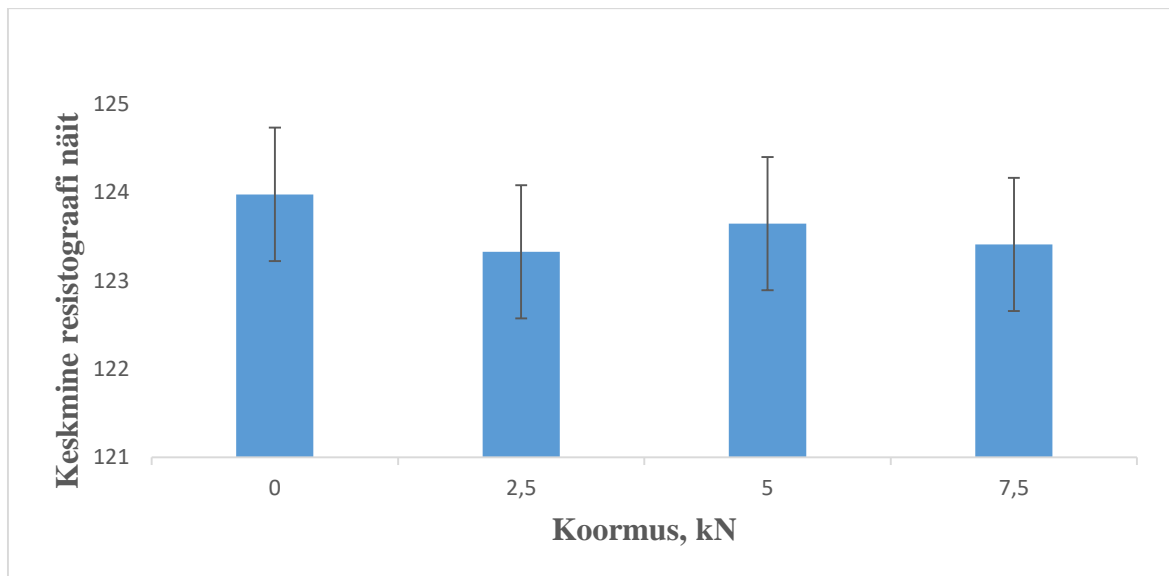
Katsetati 34 kuusest katsekeha, millest 9-l katsekehal esines rike. Defektiga katsekehad eemaldati valimist. Proovikatsete tulemusena määrati kuusest katsekehade ristikiudu survestamisel koormustsükli sammuks 2,5 kN. Iga katsekeha puuriti neli korda. Esimene puurimine teostati ilma koormust avaldamata. Seejärel avaldati katsekehale 2,5 kN suurust koormust. Koormustsükli maksimaalne koormus oli 7,5 kN, kuna katsekehad ei olnud piisavalt tugevad, et võtta vastu 9 kN suurust jõudu nagu männist katsekehad.

Katsekehale mõjuv ristikiudu koormus arvutati ümber survepingeteks ja koostati Tabel 3.2, kuhu lisati ka standardhälbed.

Tabel 3.2 Tugevussorteeritud kuusest katsekehade keskmised ristikiudu survepinged ja keskmised resistograafi näidud erinevatel koormustel

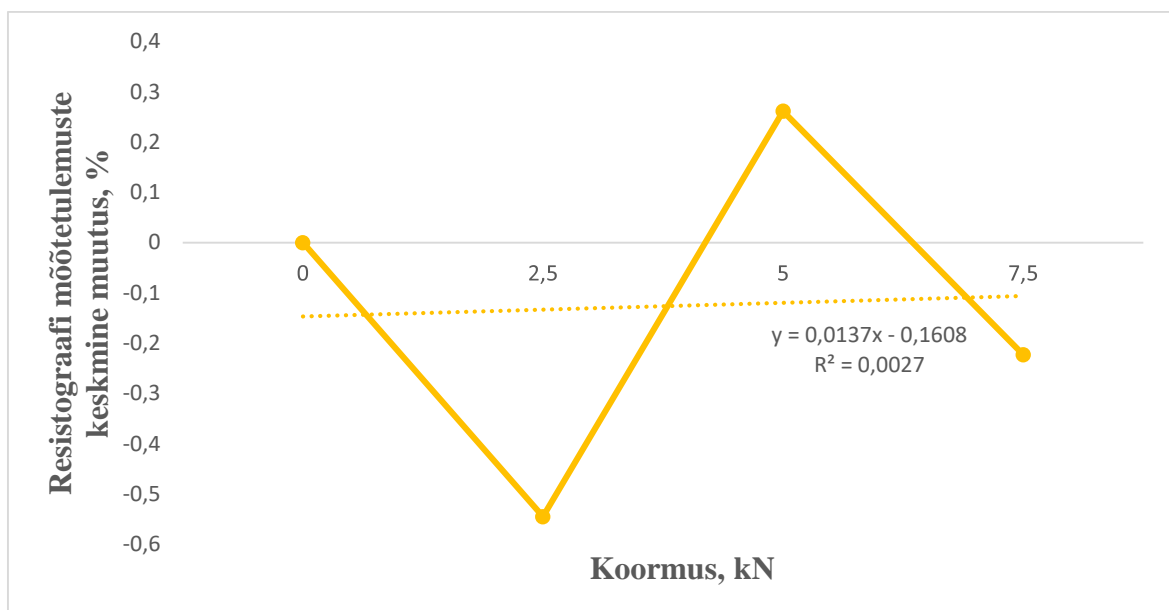
	Koormus 0 kN	Koormus 2,5 kN	Koormus 5 kN	Koormus 7,5 kN
Keskmine ristikiudu survepinge (N/mm²)	0	1,004±0,0008	2,007±0,002	3,011±0,002
Keskmine resistograafi näit	123,97±0,755	123,33±0,808	123,65±0,713	123,41±0,877

Tabel 3.2 on näha, et erinevalt männist katsekehadest kuusest katsekehade keskmine resistograafi näit koormuse kasvades ei suurene. Keskmiste väärtuste kohaselt on suurim resistograafi mõõtetulemus olukorras, kus katsekehale koormust ei avaldatud. Samuti on märkimisväärne, et 5 kN suuruse koormuse all tehtud puurimise keskmine väärtus on suurem kui 7,5 kN koormuse korral. Seda ilmestab ka Joonis 3.7.



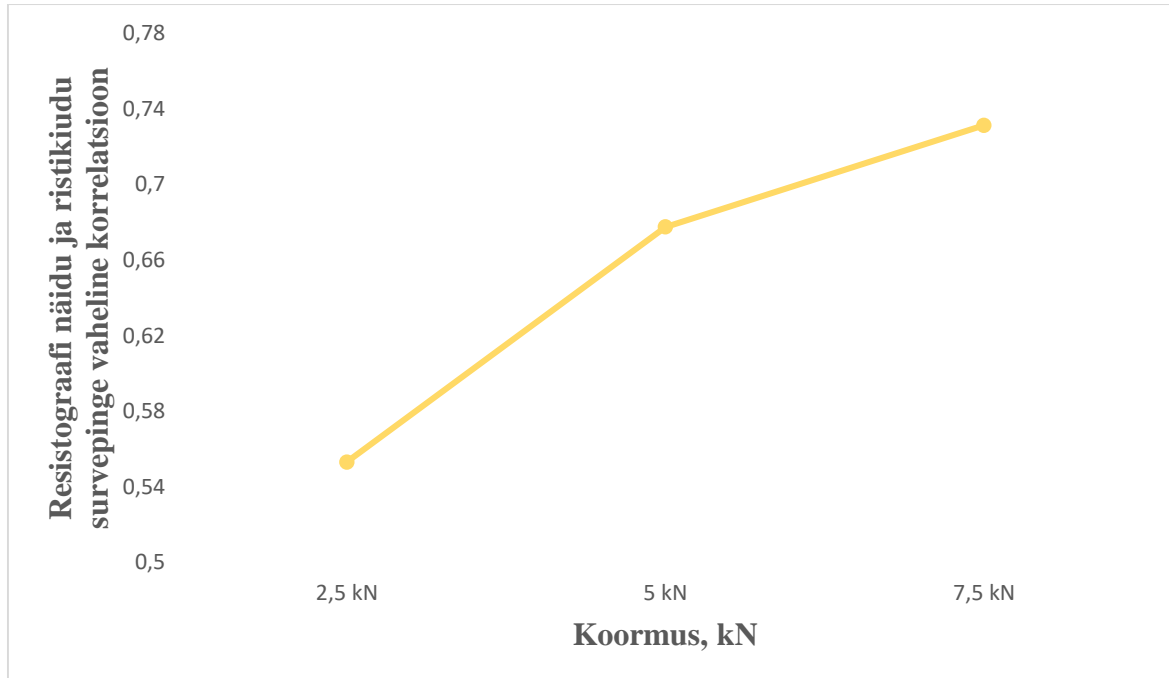
Joonis 3.7 Tugevussorteeritud kuusest katsekehade keskmine resistograafi näit erinevatel koormustel

Resistograafi mõõtetulemuste muutusi kirjeldab Joonis 3.8. Mõõtetulemuste kohaselt väheneb resistograafi näit 0,54% kui koormata katsekehasid 2,5 kN koormusega ning suureneb 0,26% kui koormus katsekehal on 5 kN ning seejärel koormust suurendades 7,5 kN-ni langeb 0,22%. Mudeli determinatsioonikordaja on 0,0027 ehk mudel pole usaldusväärne ning nende andmete põhjal ei saa resistograafi mõõtetulemuste sõltuvusest koormusest järeldusi teha.



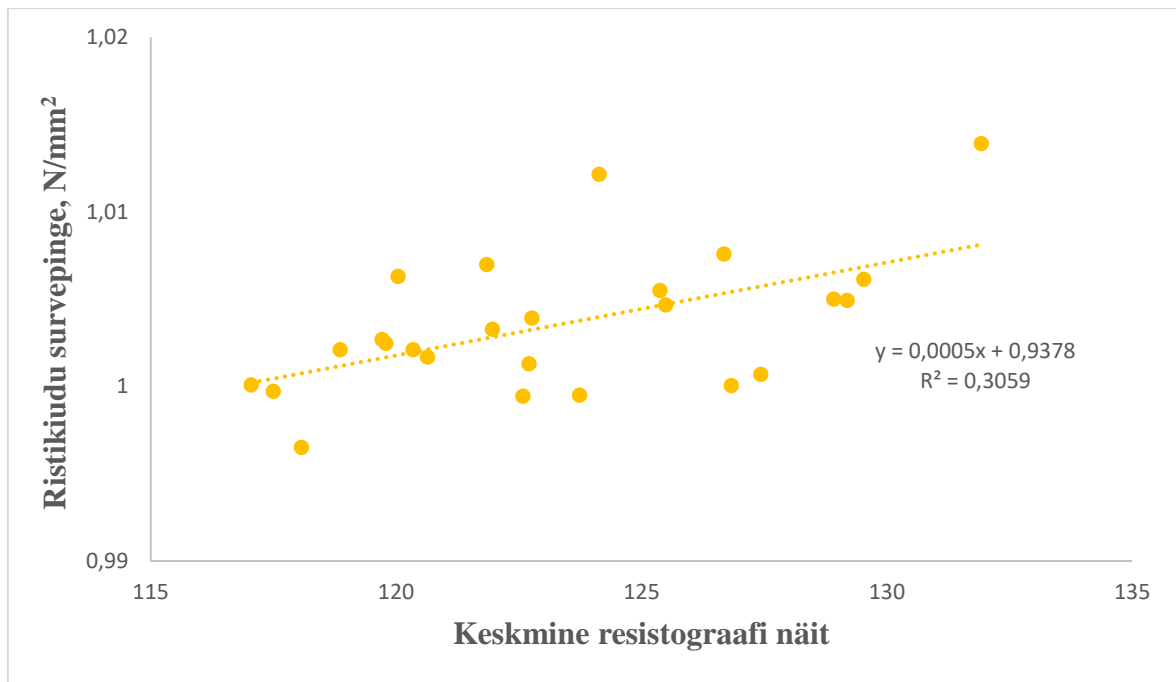
Joonis 3.8 Resistograafi mõõtetulemuste keskmine muutus koormuse kasvades

Sarnaselt männist katsekehadele on ka tugevussorteeritud kuusest katsekehade puhul resistograafi näidu ja ristikiudu survepingete vahel keskmine kuni tugev korrelatsioon. Seda iseloomustab korrelatsioonanalüüsi (Lisa 2) põhjal koostatud Joonis 3.9.

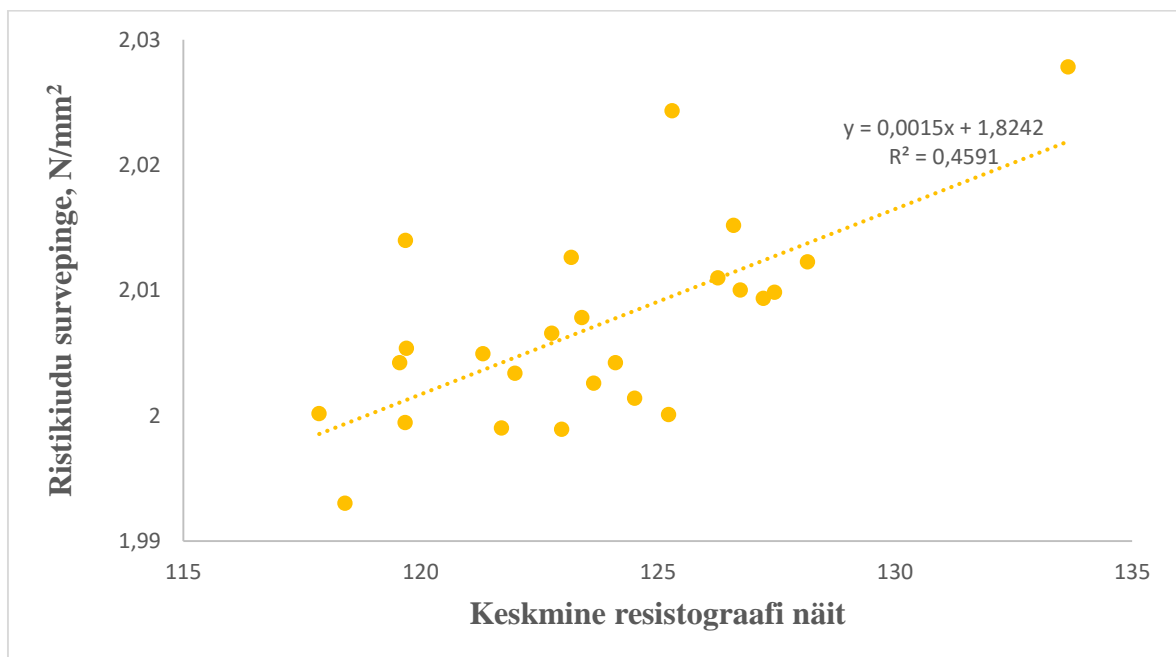


Joonis 3.9 Tugevussorteeritud kuusest katsekehade resistograafi näidu ja ristikiudu survepinge vaheline korrelatsioon erinevatel koormustel

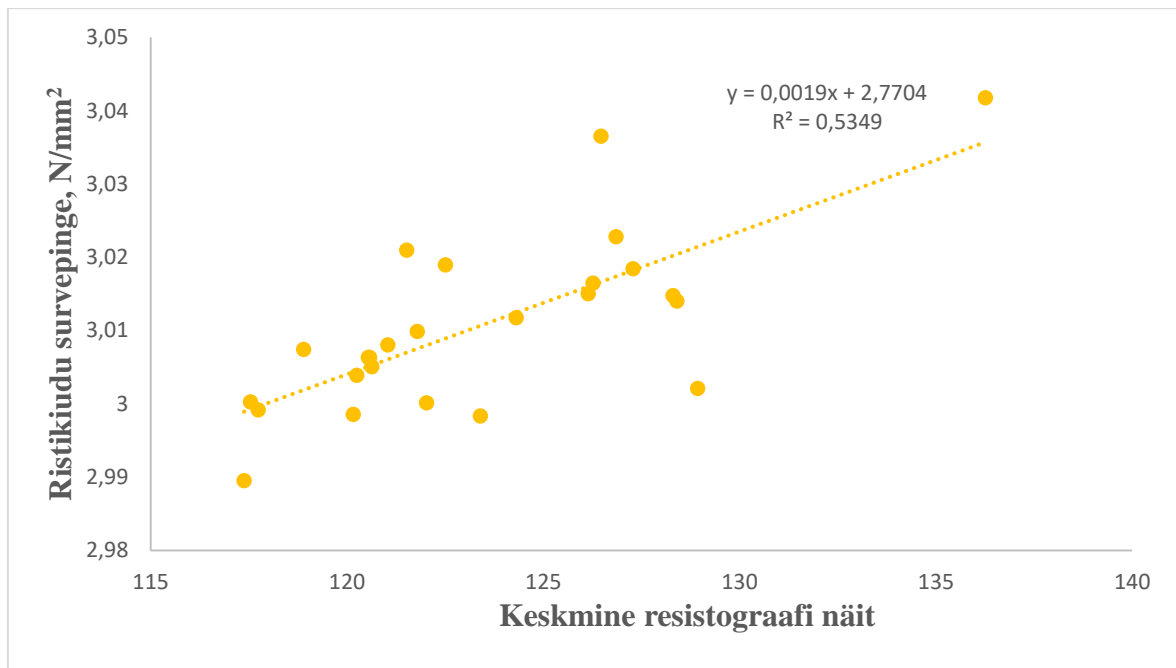
Ka tugevussorteeritud puidu puhul suureneb korrelatsioon puidu ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vahel koormuse kasvades, kuid kuusest katsekehade puhul on seos tunduvalt tugevam. Kui männi puhul jäi vastav väärtus vahemikku 0,58...0,65, siis kuuse korral on sama näitaja vahemikus 0,55...0,73. Ilmestamaks muutujate vahelist korrelatsiooni koostati Joonis 3.10, Joonis 3.11 ja Joonis 3.12.



Joonis 3.10 Ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vaheline seos 2,5 kN koormusel



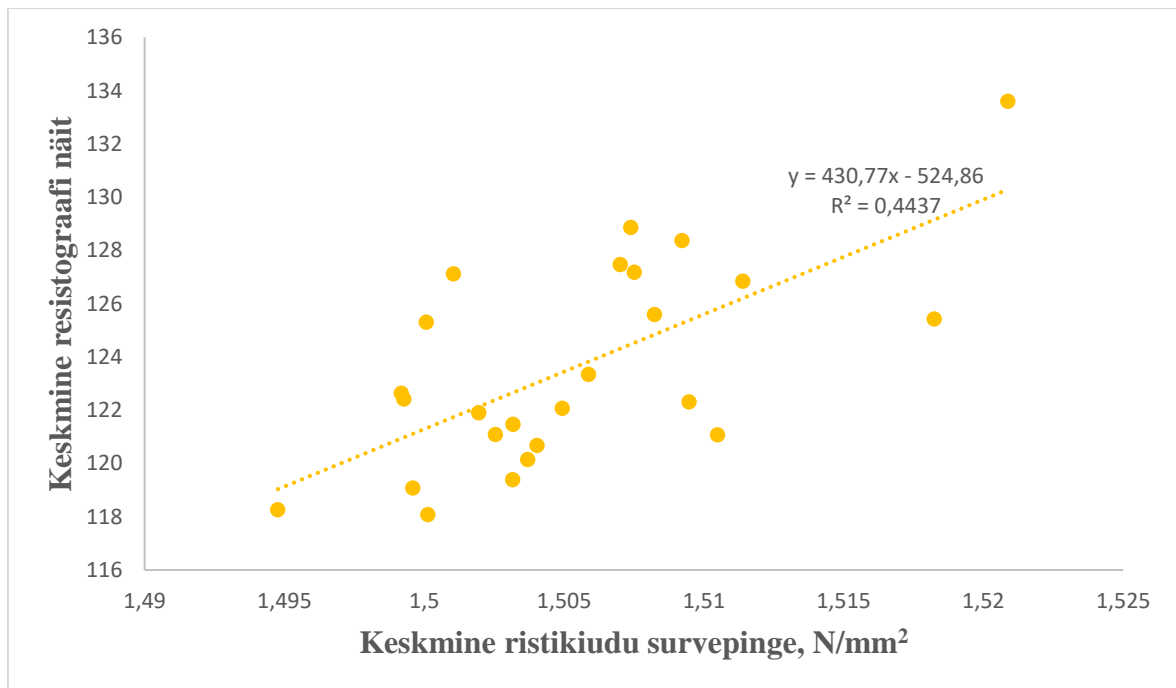
Joonis 3.11 Ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vaheline seos 5 kN koormusel



Joonis 3.12 Ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vaheline seos 7,5 kN koormusel

Joonistelt Joonis 3.10 Joonis 3.11 Joonis 3.12 selgub, et mida suurem on ristikiudu survepinge, seda suurem on ka resistograafi näit. Märkimisväärne on ka determinatsioonikordaja kasv koormuse suurenedes. Kui koormusel 2,5 kN mõõdetud resistograafi mõõtetulemuste ja ristikiudu survepinge vahelise mudeli prognoosi täpsus on 30,6% siis 5 kN ja 7,5 KN koormuste juures on sama näitaja vastavalt 45,9% ja 53,5 %. Sellest võib järeldada, et mida suurem on koormus, seda täpsem ja usaldusväärsem on mudel.

Keskmise ristikiudu survepinge ja keskmise resistograafi näidu vahelise seose hajuvusdiagramm on kujutatud Joonis 3.13.



Joonis 3.13 Keskmise resistograafi näidu ja keskmise ristikiudu survepinge vaheline seos

Joonis 3.13 kujutatud mudel on 44,4% ulatuses usaldusväärne ehk seos kahe muutuja vahel on keskmine. Mudeli kohaselt suureneb resistograafi näit ristikiudu survepinge 0,01 N/mm² võrra suurenedes 4,3 ühikut. Ehkki muutujate vaheline seos on keskmine ei ole mudel piisavalt usaldusväärne teaduslikeks järeldusteks ning antud teemat tuleks edasi uurida.

3.3.3. Konstruksioonis kasutusel olnud harilik kuusk

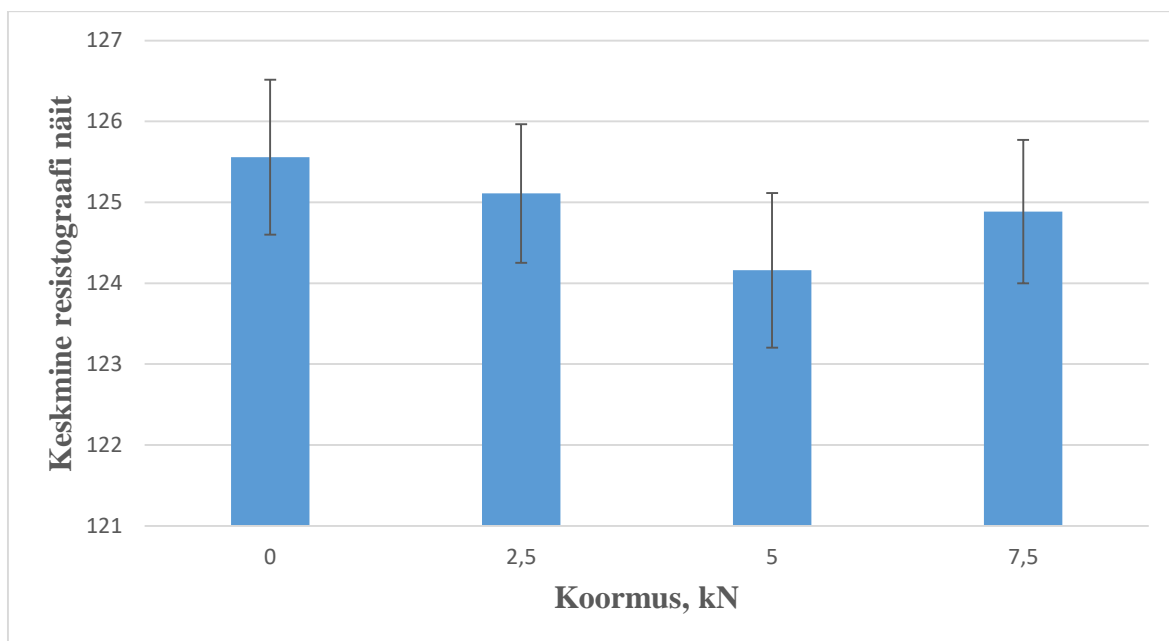
Katsekehi konstruksioonis kasutatud kuusest oli kokku 33, millest 8 osutus analüüsi tehes defektseks. Riketega katsekehad eemaldati valimist ning andmestiku analüüs tehti tervete katsekehade kohta. Sarnaselt tugevussorteeritud kuusega polnud ka konstruksioonis kasutatud kuuse ristikiudu tugevus piisav, et võtta vastu 9 kN suurus koormust. Sestap oli sarnaselt tugevussorteeritud kuusest katsekehade koormustsüklile maksimaalne koormus 7,5 kN ja koormustsükli samm 2,5 kN.

Iga katsekeha penetreeriti mikro vastupanupuuriga neli korda. Saadud tulemuste keskmised väärtused kanti Tabel 3.3.

Tabel 3.3 Konstruksioonis kasutatud kuusest katsekehade keskmised ristikiudu survepinged ja keskmised resistograafi näidud erinevatel koormustel

	Koormus 0 kN	Koormus 2,5 kN	Koormus 5 kN	Koormus 7,5 kN
Keskmine ristikiudu survepinge N/mm²	0,000	1,004±0,0008	2,007±0,002	3,011±0,002
Keskmine resistograafi näit	123,97±0,755	123,33±0,808	123,65±0,713	123,41±0,877

Tabel 3.3 ilmestamiseks koostati tulpdiagramm (Joonis 3.14). Jooniselt on näha, et keskmine resistograafi näit langeb koormuse kasvades ning jääb maksimaalse ristikiudu surve korral väiksemaks kui koormuseta olukorras tehtud puurimiste keskmine väärtus.

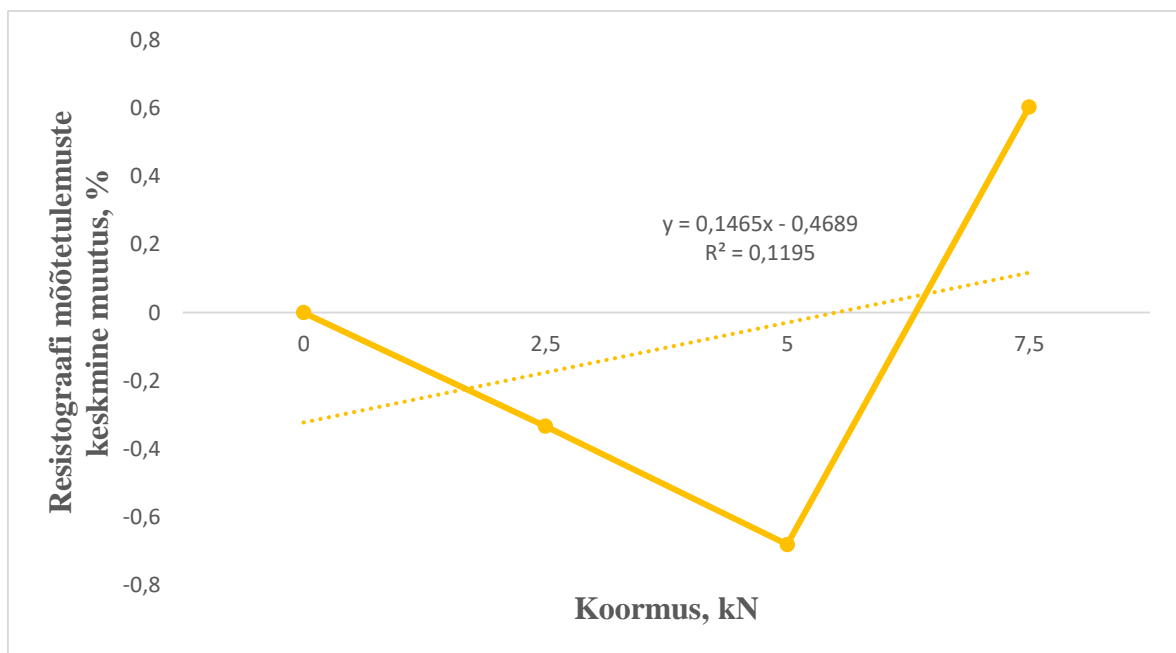


Joonis 3.14 Konstruksioonis kasutatud puidu resistograafi näit erinevatel koormustel

Olukord, kus koormuseta sooritatud puurimiste keskmine väärtus on suurem kui maksimaalse koormuse sama näitaja on sarnane tugevussorteeritud kuusest katsekehadega.

Nendele kahele katsekeha grupile tuginedes võib väita, et resistograafi mõõtetulemus ei sõltu ristikiudu koormusest. Tabel 3.1 esitatud tulemused on aga vastupidised.

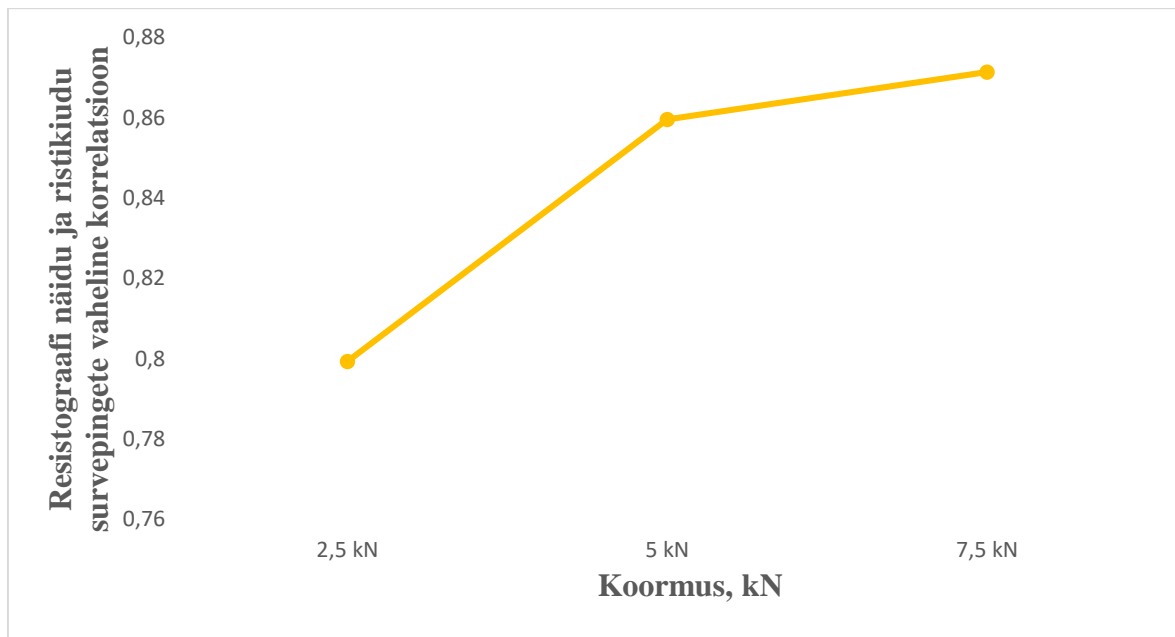
Resistograafi mõõtetulemuste muutusi erinevatel koormustel iseloomustab Joonis 3.15. Mudeli kohaselt väheneb resistograafi näit ristikiudu koormuse kasvades kuni koormuseni 5 kN. Maksimaalse koormuse (7,5 kN) juures suureneb mõõtetulemus 0,6% Mudeli usaldatus on vaid 12% ning teaduslikke järeldusi selle põhjal teha ei saa. Võrreldes teiste katsekehade gruppidega on graafik ning mõõtetulemused erinevad.



Joonis 3.15 Resistograafi mõõtetulemuste keskmine muutus erinevatel koormustel

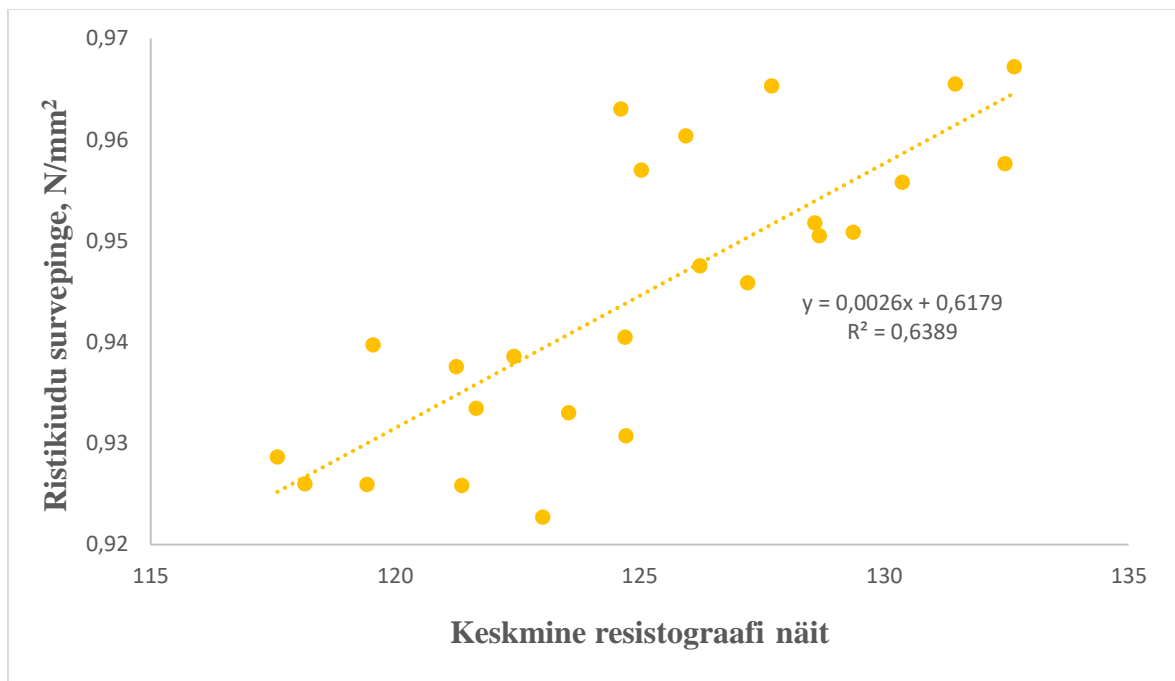
Kuna autorile teadaolevalt pole varasemalt sellise meetodiga katseid tehtud, ei ole saadud tulemusi millegagi võrrelda. Lõplike järelduste tegemiseks tuleks antud teemat põhjalikumalt uurida.

Sarnaselt männist ja tugevussorteeritud kuusest katsekehadele on ka konstruktsioonis kasutusel olnud kuusest katsekehade puhul resistograafi näidu ja ristikiudu survepingete vahel keskmine kuni tugev korrelatsioon. Seda iseloomustab korrelatsioonanalüüsi (Lisa 3) põhjal koostatud Joonis 3.16.

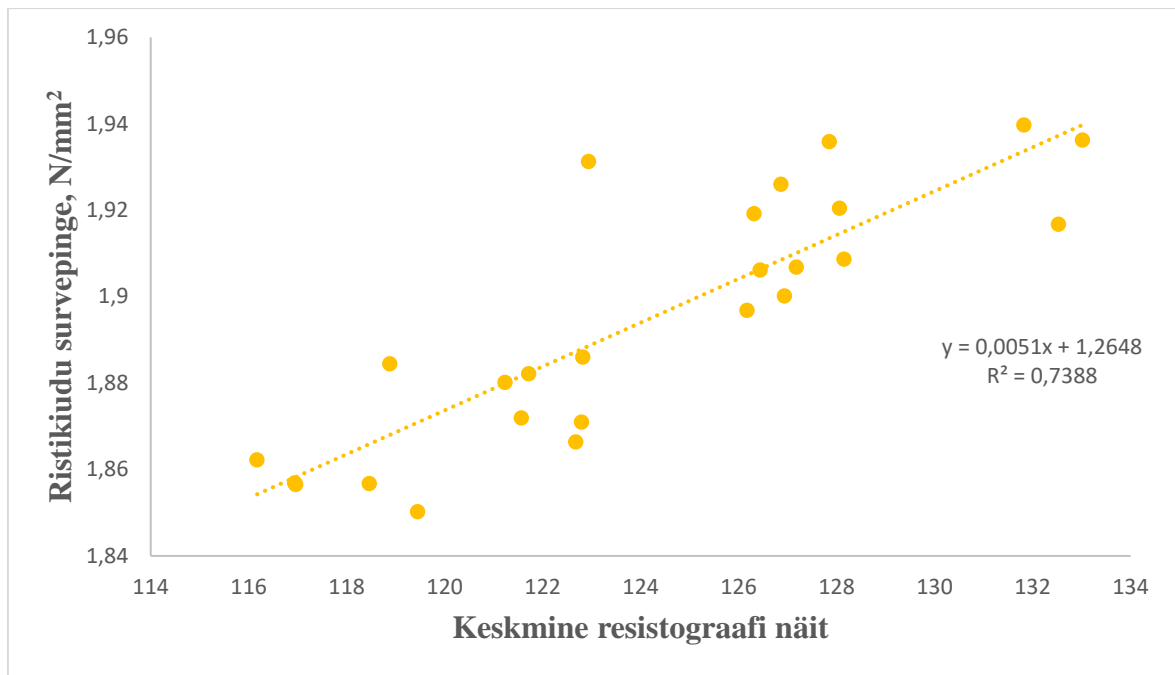


Joonis 3.16 Resistograafi näidu ja ristikiudu survepingete vaheline korrelatsioon erinevatel koormustel

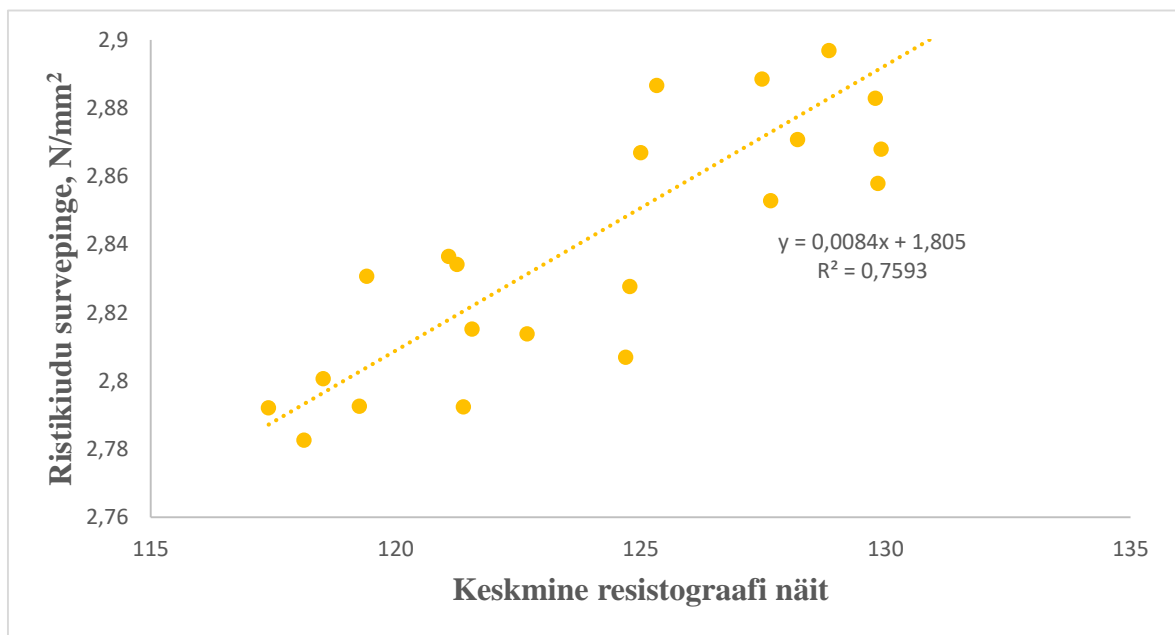
Ristikiudu survepingete ja resistograafi näitude vahel on keskmise tugevusega korrelatsioon. Erinevatel koormustel tehtud puurimiste ja ristikiudu survepingete vahelised seosed on esitatud Joonis 3.17, Joonis 3.18 ja Joonis 3.19.



Joonis 3.17 Ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vaheline seos 2,5 kN koormusel



Joonis 3.18 Ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vaheline seos 5 kN koormusel

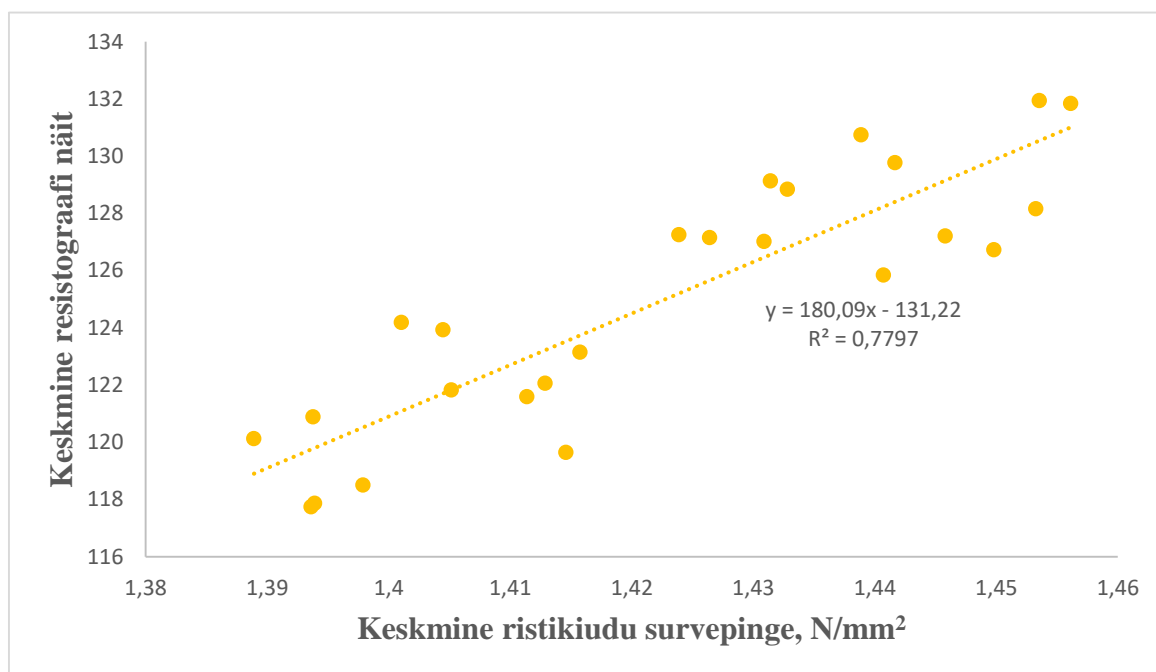


Joonis 3.19 Ristikiudu survepinge ja resistograafi näidu vaheline seos 7,5 kN koormusel

Joonistelt Joonis 3.17, Joonis 3.18Joonis 3.19 on näha, et mida suurem on koormus seda suurem on ka resistograafi näidu ja ristikiudu surve vaheline korrelatsioon. 2,5 kN suuruse surve all on determinatsioonikordaja 0,64 ning 5 kN ja 7,5 kN surve all on samad näitajad

vastavalt 0,74 ja 0,76. See tähendab, et maksimaalse koormuse juures on mudeli usaldusväärsus 76%, mis on väga kõrge. Männi ja tugevussorteeritud kuuse puhul olid samad näitajad vastavalt 43% ja 53%.

Keskmise resistograafi näidu ja keskmise ristikiudu survepinge vahelise seose uurimiseks koostati hajuvusdiagramm Joonis 3.20.

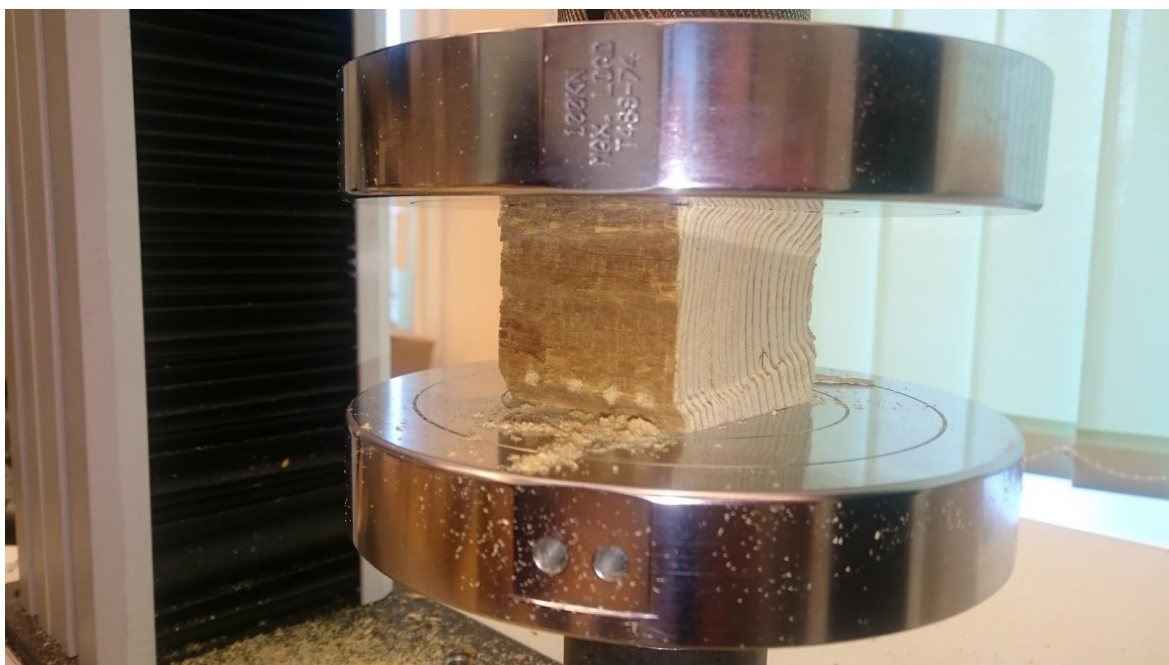


Joonis 3.20 Konstruksioonis kasutusel olnud kuuse keskmise resistograafi näidu ja keskmise ristikiudu survepinge vaheline seos

Konstruksioonis kasutusel olnud kuuse keskmise resistograafi näidu ja keskmise ristikiudu survepinge vaheline korrelatsioon on tugev. Determinatsioonikordaja on antud juhul 0,78 ehk mudeli kirjeldatus on 78%. Mudeli kohaselt suureneb resistograafi näit ristikiudu survepinge 0,1 N/mm² võrra suurenedes 1,8 ühikut. Kuigi seos kahe muutuja vahel on tugev ning mudeli usaldusväärsus on üle 75% vajab ka antud aspekt põhjalikumat uurimist, et teaduslikke järeldusi teha. Võrreldes antud mudelit männi ja tugevussorteeritud kuuse mudelitega on selle kirjeldatus suurem. Männi puhul oli kirjeldatus 41,5% ning tugevussorteeritud kuusel oli see 44,4%.

3.3.4. Vastupanu mikropuurimine ristikiudu surve all – üldised järeldused

Töös kasutusel olnud metoodika kohaselt toimusid resistograafia puurimised katsekeha alumises veerandis (Joonis 2.6). Joonis 3.21 on näha, et katsekeha on ristikiudu survest enim mõjutatud surveplaatide juures ehk ülemises ja alumises veerandis.



Joonis 3.21 Katsekeha ristikiudu surve all (foto: Marko Teder)

Kuna mõõtmised toimusid ainult katsekeha alumises osas ei ole teada kas ja kui palju mõjutab puurimiskoha valik mõõtetulemusi. Edasistel uuringutel tuleks sellele aspektile tähelepanu pöörata. Lisaks tuleks koormustsükli sammu vähendada ning teostada puurimisi suurematel koormustel kuni proovikeha purunemiseni.

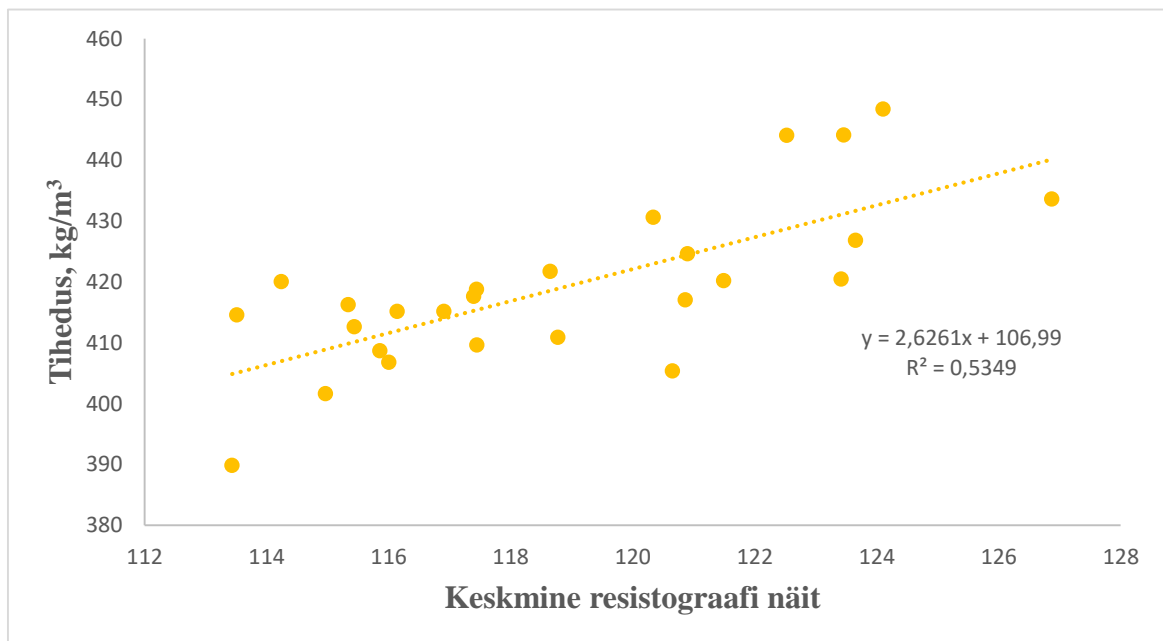
Kuna väikesed koormused ei avaldanud mikropuurimisele märkimisväärset mõju ei ole ristikiudu surve arvestamine mõõtmisel vajalik. Kuid suurematel koormustel avaldab survekoormus resistograafi mõõtetulemustele märkimisväärset mõju.

3.4. Vastupanu mikropuurimise korrelatsioon puidu tihedusega

3.4.1. Harilik mänd

Resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vahelist seost on uuritud palju, kuid vastuoluliste tulemuste tõttu on teema jätkuvalt aktuaalne. Lisaks pole piisavalt uuritud Eestis kasvanud puuliike.

Männipuust katsekehasid puuriti koormuseta olukorras ning saadud tulemuste ja katsekehade tiheduste vahel tehti regressioonanalüüs (Lisa 4). Analüüsist selgus, et kahe tunnuse vaheline korrelatsioon on tugev ($r=0,73$). Ka mudeli ($p<0,05$) usaldusväärsus on üle 50% täpsemalt 53,5%. Mudeli kohaselt suureneb puidu tihedus resistograafi näidu ühe ühiku võrra suurenedes $2,626 \text{ kg/m}^3$. Mudeli ilmetamiseks koostati hajuvusdiagramm (Joonis 3.22).

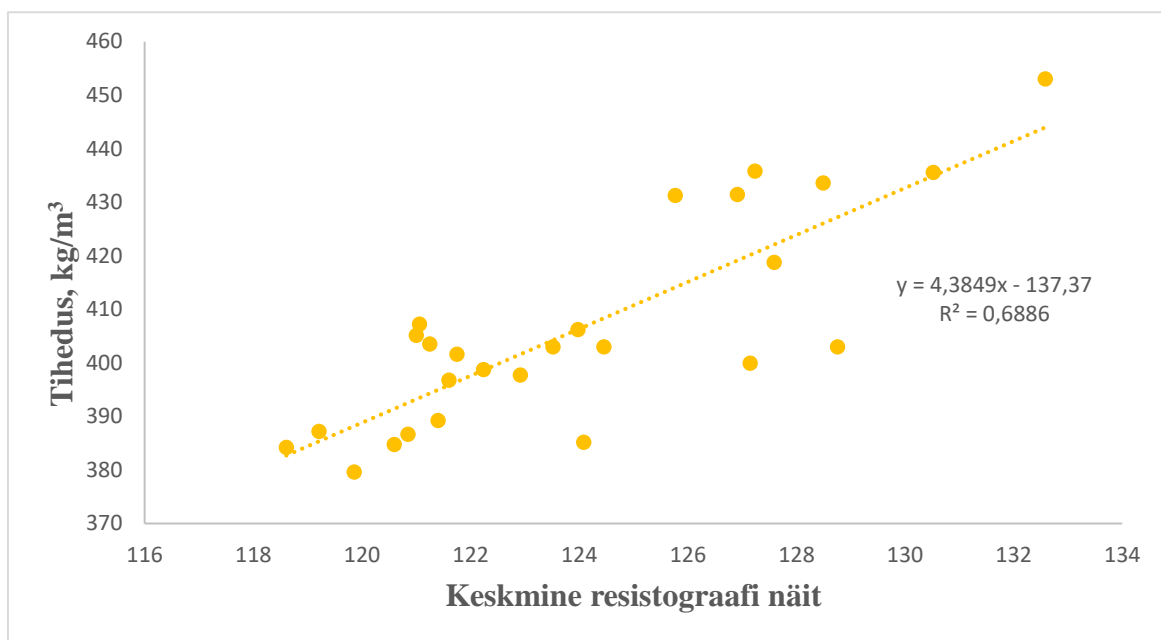


Joonis 3.22 Resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline seos

Ka varasemalt uuritud männipuust katsekehade tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vaheline seos on osutunud tugevaks. Kloiberi 2014. aastal uuritud männist katsekehade resistograafiga saadud mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline seos oli tugev ($r=0,75$). (Kloiber, Tippner, & Hrivnak, 2014)

3.4.2. Konstruktsioonis kasutamata harilik kuusk

Konstruktsioonis kasutamata kuusest katsekehade puhul uuriti tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahelist seost samamoodi nagu männist katsekehade puhul. Puurimised teostati koormuseta olukorras ning tulemuste põhjal tehti regressioonanalüüs (Lisa 5). Tulemused on esitatud Joonis 3.23.



Joonis 3.23 Resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline seos

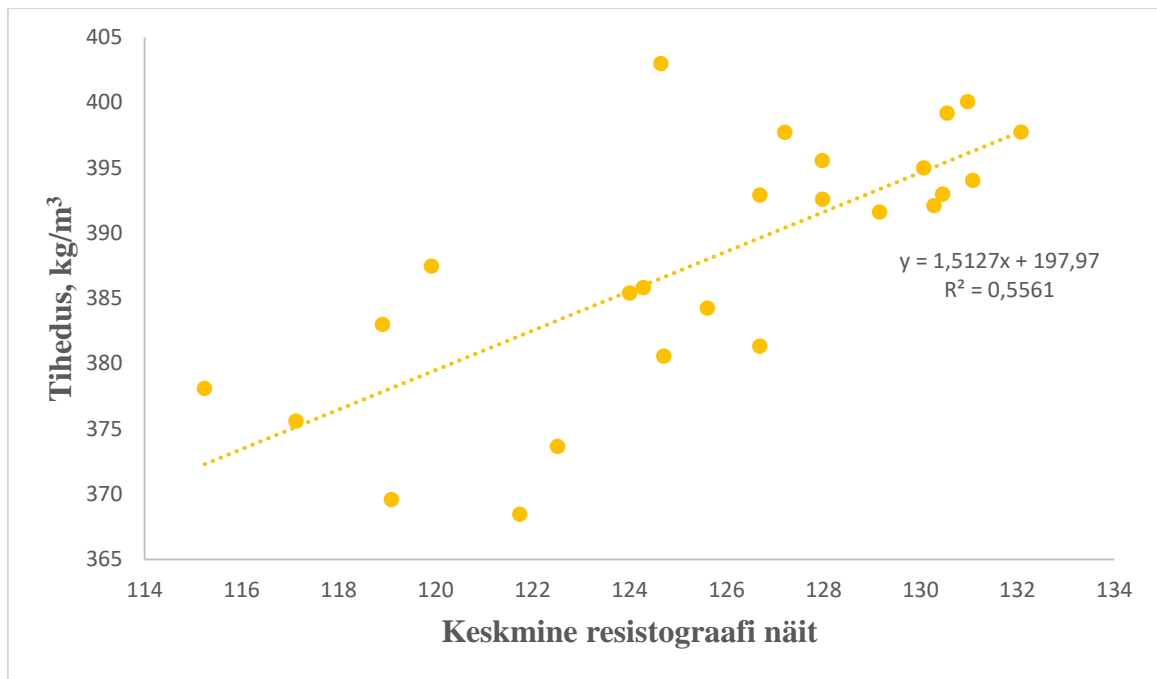
Joonis 3.23 on näha, et tiheduse kasvades suureneb ka resistograafi näit. Korrelatsioonikordaja on antud muutujate vahel $r=0,83$, mis on väga tugev. Saadud mudeli ($p<0,05$) usaldusväärsus on 69%. Resistograafi näidu suurendes ühe ühiku võrra suureneb tihedus $4,085 \text{ kg/m}^3$.

Saadud tulemus on kooskõlas 2014. aastal Kloiberi poolt saadud tulemustega, kui kuusest katsekehade tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vaheliseks seoseks saadi $r=0,74$. (Kloiber, Tippner, & Hrivnak, 2014)

3.4.3. Konstruksioonis kasutusel olnud harilik kuusk

Uue ja konstruksioonis kasutusel olnud puidu tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahelisi erinevusi ja seoseid on ka varasemalt uuritud, kuid Eestis kasvanud puitu pole autorile teadaolevalt samal meetodil uuritud.

Katsekehasid puuriti koormuseta olukorras ning saadud tulemustele tehti regressioonanalüüs (Lisa 6). Tulemuste põhjal koostati Joonis 3.24.



Joonis 3.24 Resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline seos

Joonisel esitatud mudeli ($p < 0,05$) kohaselt suureneb tihedus koos resistograafi näiduga. Mudeli determinatsioonikordaja on 0,56, mis on küllaltki kõrge, kuid tunduvalt madalam kui seda oli tugevussorteeritud kuuse sama näitaja ning jäädes samasse suurusjärku männist katsekehade R^2 -ga. Mudeli kohaselt resistograafi näidu suurenedes ühe ühiku võrra, suureneb puidu tihedus 1,513 kg/m³ võrra. Mudeli põhjal saadud tulemust tuleb arvestada informatiivsena ning konstruktsiooni seisukorra hindamiseks ei ole see piisavalt usaldusväärne.

3.4.4. Vastupanu mikropuurimise ja tiheduse vahelise seose mõõtmise üldised probleemid

Üldjuhul puidu tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vaheline korrelatsioon keskmine (Tabel 1.1). Selle üheks põhjuseks võib pidada kuivkaalu meetodil määratud tihedus, mis on küll korrektne, kuid resistograafi mõõtmiste lokaalsuse tõttu ebatäpne. Teisalt ei andnud ka M. J. M. Conde (Morales Conde, Machado, & Rodriguez Linan, 2014) poolt tehtud uuringus puursüdamikuga määratud tihedus märkimisväärselt paremat korrelatsiooni.

KOKKUVÕTE

Magistritöö eesmärgiks oli uurida uue ja konstruktsioonis kasutusel olnud okaspuidu ristikiudu survepinge ja resistograafi mõõtetulemuste vahelisi seoseid ning neid omavahel võrrelda. Lisaks uuriti puidu tiheduse ja vastupanu mikropuurimise vahelist korrelatsiooni. Selleks valmistati 100 konstruktsioonis kasutamata männipuust, värskelt saetud konstruktsioonis kasutamata kuusest ning konstruktsioonis kasutusel olnud kuusest vastavalt 33, 34 ja 33 katsekeha. Esmalt määrati katsekehade tihedused ning seejärel sooritati vastupanu mikropuurimised seadmega Resistograph 4453-P koormuseta olukorras ja erinevatel koormustel.

Katsetulemustele teostati statistiline analüüs, milles selgus, et grupiti on männist katsekehade ristikiudu survepinge ja resistograafi mõõtetulemuste vahel keskmine lineaarne korrelatsioon ($r=0,58...0,65$). Kuusest katsekehade sama korrelatsioon on keskmine kuni tugev, konstruktsioonis kasutamata kuusepuidust katsekehadel $r=0,55...0,73$ ja konstruktsioonis kasutusel olnud kuusepuidu puhul $r=0,8...0,87$. Kuusepuidust katsekehade korrelatsioon vastupanu mikropuurimise ja ristikiudu survepingete vahel on tugevam kui sama näitaja männist katsekehadel. Võrreldes uut ehk konstruktsioonis kasutusel mitteolnud puitu vana ehk kasutatud puiduga selgub, et vana puidu uuritav korrelatsioon oli märkimisväärselt tugevam.

Veel uuriti töös survekoormuse mõju resistograafi näidule. Männipuust katsekehade puhul suurenesid mikro vastupanupuurimise tulemused koormuse kasvades. Sealjuures, mida suuremat koormust katsekehale avaldati, seda kiiremini resistograafi näit suurenes. Konstruktsioonis kasutamata tugevussorteeritud kuuse puhul ühtset mudelit välja ei kujunenud ning koormuseta olukorras sooritatud mõõtmiste keskmine väärtus oli suurim. Konstruktsioonis kasutatud kuusepuidust katsekehade korral oli kõrgeim resistograafi väärtus maksimaalsel koormusel, kuid väiksematel koormustel mõõtetulemused muutusid võrreldes koormuseta olukorras saadud tulemusele väiksemaks.

Töö kolmanda osana uuriti puidu tiheduse ja resistograafi mõõtetulemuste vahelist seost. Analüüsi käigus selgus, et kõige tugevam ($r=0,83$) oli korrelatsioon tugevussorteeritud hariliku kuuse puhul. Harilikust männist katsekehade korral oli sama näitaja 0,73 ning konstruktsioonis kasutusel olnud harilikul kuusel 0,74. Kõigil kolmel juhul oli seos tugev ning mudel oluline ($p<0,05$).

Varasemates uuringutes (Lourenco, Feio, & Machado, 2007; Feio, Lourenco, & Machado, 2007) on tiheduse ja resistograafi mõõtmiste vaheline korrelatsioon olnud tugevam vana ehk konstruktsioonis kasutusel olnud puidul. Magistritöös uuritud materjalidest oli tugevama korrelatsiooniga uus puit. Töös käsitletud varasemalt tehtud uuringutes uuriti harilikku kastanit ning seetõttu ei saa saadud teadmiste põhjal teaduslikke järeldusi teha ning antud teema vajab põhjalikumat uurimist.

Kokkuvõttes võib järeldada, et resistograafi mõõtetulemused on sõltuvuses puidu ristikiudu survepingega. Mida suurem on puidu survepinge, seda suurem on resistograafi näit, seda eriti kuusepuidu puhul. Seda tuleks resistograafiga mõõtes arvesse võtta, eriti suure survepingega olukorras. Teisalt selgus tööst, et vastupanu mikropuurimise tulemuste seos on ristikiudu survekoormusega kuusepuidust katsekehade puhul nõrk ning männipuidu puhul tugev. Kuna tulemused on kahe puuliigi puhul vastuolulised ning samal meetodil pole autorile teadaolevalt uuringuid tehtud, tuleks antud teemat täpsemalt uurida.

Vastupanu mikropuurimise seade on arvestatav töövahend hindamaks puidu tihedust ning seeläbi kogu konstruktsiooni. Seadet kasutades tuleb arvestada puidu niiskusega ja puuri teravusega, mis mõjutavad tulemuste täpsust ning usaldusväärsust.

Resistograafiga tuleks teostada lisauuringuid leidmaks kinnitust seadme mõõtetulemuste ja ristikiudu surve ja survepingete vahelise korrelatsiooni kohta. Järgnevates uuringutes tuleks mõõta katsekehade vastupanu võimet suurematel ristikiudu koormustel ning kuni katsekeha purunemiseni.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Acuna, L., Bastaerra, L. A., Casado, M., Lopez, G., Ramon-Cueto, G., Relea, E., . . . Gonzalez, A. (2011). Application of Resistograph to Obtain the Density and to Differentiate Wood Species. *Materiales de Construcción*, 451-464.
- Ali, K. H., Hussain, T., & Kamali, A. (7. 7 2014. a.). Compression perpendicular to grain in timber - Bearing strength for a still plate. Växjö: Linneuniversitetet.
- Ceraldi, C., Mormone, V., & Russo Ermolli, E. (2001). Resistographic Inspection of Ancient Timber Structures for the Evaluation of Mechanical Characteristics. *Materials and Structures*, 59-64.
- EVS:338. (2016). EVS_EN_338:2016 Ehituspuit Tugevusklassid. Tallinn: Eesti standardikeskus.
- Faggiano, B., Grippa, M. R., Marzo, A., & Mazzolani, F. M. (2011). Experimental Study for Non-Destructive Mechanical Evaluation of Ancient Chestnut Timber. Napoli: University of Naples.
- Feio, A. O., Lourenco, P. B., & Machado, J. S. (2007). Non Destructive Evaluation of the Mechanical Behavior of Chestnut Wood in Tension and Compression Parallel to Grain. *International Journal of Architectural Heritage*, 272-292.
- Gantz, C. H. (2002). Evaluating the Efficiency of the Resistograph to Estimate Genetic Parameters for Wood Density in Two Softwood and Two Hardwood Species. Raleigh: North Carolina State University.
- Haygreen, J., & Bowyer, J. (1996). *Forest products and wood science*. Ames: Iowa State University Press.
- Henriques, D. F., Nunes, L., Machado, J. S., & Brito, J. (2011). Timber in buildings: estimation of some properties using pilodyn and resistograph. *International conference on durability of building materials and components*. Porto.
- Hueck, H. (2001). The biodeterioration of materials - an appraisal. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 5-11.
- Just, E.-J., Õiger, K., & Just, A. (2015). *Puit- ja puidupõhised konstruktsioonid*. Tallinn: TTÜ kirjastus.

- Kaart, T. (2010). *Kahe arvtunnuse ühine käitumine, korrelatsioon- ja regressioonanalüüs*. Kasutamise kuupäev: 14. 03 2017. a., allikas http://www.eau.ee/~ktanel/DK_0007/DK_loeng31.pdf
- Kloiber, M., Tippner, J., & Hrivnak, J. (2014). Mechanical Properties of Wood Examined by Semi-destructive Devices. *Materials and Structures*, 199-212.
- Konsa, K., & Pilt, K. (2013). *Majavamm, puukoi ja teised kahjurid*. Tallinn: Tammeraamat.
- Kruuda, R. (2010). Resistograafi mõõtetulemuste sõltuvus puidu sisepingetest. Tartu.
- Lainurm, M. (2010). Korrelatsioon puidu erinevate karakteristikute ja mittepurustavatel meetoditel saadud tulemuste vahel. Tartu.
- Lin, C.-J., Wang, S.-Y., Lin, F.-C., & Chiu, C.-M. (2003). Effect of Moisture Content on the Drill Resistance Value in Taiwan Plantation Wood. *Wood and Fiber Science*, 234-238.
- Lourenco, P. B., Feio, A. O., & Machado, J. S. (2007). Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlation for test result in new and old wood. *Construction and Building Materials*, 1617-1627.
- Morales Conde, M. J., Machado, J. S., & Rodriguez Linan, C. (2014). Predicting the Density of Structural Timber Members in Service. The Combine Use of Wood Cores and Drill Resistance Data. *Materiales de Construcción*.
- Nowak, T. P., Jasienko, J., & Hamrol-Bielecka, K. (2016). In situ assessment of structural timber using the resistance drilling method - Evaluation of usefulness. *Construction and Building Materials*, 403-415.
- Nutto, L., & Biechele, T. (2015). Drilling resistance measurement and the effect of shaft friction – using feed force information for improving decay identification on hard tropical wood. *19th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, (lk 154-161). Rio de Janeiro.
- Nõmme, E. (2015). Kasutuses Olnud Konstruksioonipuidu Uurimine Mittepurustavalt ja purustavalt. Tartu.
- Persson, K. (2000). Micromechanical Modelling of Wood and Fibre Properties. Lund: Lund University.
- Piazza, M., & Riggio, M. (2008). Visual Strength-Grading and NDT of Timber in Traditional Structures. *Journal of Building Appraisal*, 267-296.
- Rinn, F. (2012). Basics of micro-resistance drilling for timber inspection. *Holztechnologie* 53(3), lk 24-29.

- Rinn, F. (2016). *Rinntech*. Kasutamise kuupäev: 23. 6 2016. a., allikas <http://www.rinntech.de/>
- Rinn, F., Schweingruber, F. H., & Schär, E. (1996). Resistograph and X-ray Density Charts of Wood Comparative Evaluation of Drill Resistance Profiles and X-ray Density Charts of Different Wood Species. *Holzforschung*(50), 303-311.
- Saarman, E., & Veibri, U. (2006). *Puiduteadus*. Tartu: Eesti Metsaselts.
- Tannert, T., Anthony, R. W., Kasal, B., Kloiber, M., Piazza, M., Riggio, M., . . . Yamaguchi, N. (2013). In situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. *Materials and Structures*.
- Teder, M. (2016). *Puidu ja liimpuidu füüsikalise-mehaaniliste omaduste uurimine mittepurustavate meetoditega*. Tartu.
- Teder, M., Pilt, K., Miljan, M., Lainurm, M., & Kruuda, R. (2012). Overview of some non-destructive techniques for in situ condition assessment of timber structures. *Fungi and Beetles in Historic Timber Structures in Northern Europe, Proceedings of the international workshop*, (lk 59–67). Petrozavodsk.
- Tseng, Y.-J., & Hsu, M.-F. (2008). Evaluating the Mechanical Properties of Wooden Components Using Drill Resistance Method. Taipei.
- Veermets, K. (1962). *Puidu määraja makro-ja mikroskoopiliste tunnuste järgi*. Tallinn: Eesti Riiklik Kirjastus.
- Wood handbook: Wood as an engineering material*. (1974). Washington: Forest Products Laboratory Forest Service U.S. Department of Agriculture.
- Ütsik, L. (2015). Kuuse (*Picea Abies*) ja männi (*Pinus Sylvestris*) konstruktsioonipuidu tugevussorteerimine erinevate meetoditega. Tartu.

SUMMARY

The aim of the Master's thesis is to study and compare the resistograph's measurements correlation between resistance micro-drilling and compression stresses perpendicular to the grain in new and used-in-structure softwood. In addition, the correlation between the density of wood and resistance micro-drilling was studied. 100 test pieces were made for this study out of: unused pinewood (33 pcs), freshly sawed and unused-in-the-structure spruce wood (34), and used-in-the-structure spruce wood (33). First the densities of the test pieces were measured and then the resistance micro-drillings were performed in unloaded and loaded situations with the Resistograph 4453-P.

In addition to test results a statistical analysis was performed that revealed the average linear correlation between the resistograph's measurements and compression load perpendicular to the grain in pine wood test pieces to be ($r=0,58...0,65$). The corresponding correlation between spruce wood test pieces is medium-strong to strong: $r=0,55...0,73$ for spruce wood test pieces not used in the structure, and $r=0,8...0,87$ for spruce wood test pieces used in the structure. The correlation between resistance micro-drilling and compression stresses perpendicular to the grain of spruce wood test pieces is stronger than that of pine wood test pieces. Comparing the corresponding correlations between new/unused-in-structure wood with old/used-in-structure wood, it reveals that the correlation for old wood is significantly stronger.

As part of the study the compression load effects on the reading of the resistograph were researched. In the case of pine wood test pieces the resistance micro-drilling results grew with the increase of the load. The more load was introduced on the test piece the faster the reading on the resistograph grew. No one model for the strength-graded unused-in-structure spruce wood shaped out from the findings and the average of measurements was higher in unloaded situations. The resistograph's reading was the highest with the maximum load on spruce wood that was used in the structure, but the results for lower loads turned out to be smaller than unloaded situations.

As the last part of the work the correlation between the measurement results of the resistograph and the wood's density was studied. It was found that the strongest correlation ($r=0,83$) occurred whilst using strength graded common spruce. In the case of common pine

the correlation was 0,73; and 0,74 for the common spruce used in the structure. The correlation as well as the model ($p < 0,05$) is significant for all three test pieces.

Earlier studies (Lourenco, Feio, & Machado, 2007; Feio, Lourenco, & Machado, 2007) have found the correlation between the density and the resistograph measurements to be stronger with old wood or wood used in the structure. The materials studied in this thesis gave the strongest correlation with new wood. The studies referenced to in the thesis researched the common chestnut tree, and thus no further scientific conclusions can be made of this discrepancy and more research in to the topic is required.

It can be concluded that the measurement results of a resistograph are in correlation with compression stresses perpendicular to the grain in wood. The higher the compression stresses of the wood, the bigger the reading of the resistograph, especially with spruce wood. This should be considered—particularly in cases of high compression stress. The thesis also found that the correlation between resistance micro-drilling and the test pieces of spruce wood with compression load perpendicular to the grain is weak, whereas the same correlation between test pieces of pine wood is strong. Since the results between two different tree species are contradictory, and the author knows of no other studies that have been done on the same topic, the subject matter need further research.

The device for resistance micro-drilling is a considerable tool for evaluating the density of the wood and therefore the whole structure. The dampness of the wood as well as the sharpness of the drill need to be taken into account for accurate and reliable results.

More studies of the resistograph need to be done to find more proof between the correlation of measurements, resistance micro-drilling and compression stresses. Future studies should measure the test pieces' resistance capability for higher loads of compression perpendicular to the grain and compression stresses until the failure of the test piece.

LISAD

Lisa 1. Männipuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks

			Resistograafi näit 0 kN juures	Resistograafi näit 3 kN juures	Resistograafi näit 6 kN juures	Resistograafi näit 9 kN juures	Survepinge 0 kN juures	Survepinge 3 kN juures	Survepinge 6 kN juures	Survepinge 9 kN juures
Mass g	1									
ρ kg/m ³	0,798145	1								
Resistograafi näit 0 kN juures	0,473661	0,731386	1							
Resistograafi näit 3 kN juures	0,459625	0,687367	0,96226	1						
Resistograafi näit 6 kN juures	0,497457	0,723046	0,957425	0,97613	1					
Resistograafi näit 9 kN juures	0,347274	0,635562	0,885617	0,863285	0,852823	1				
Survepinge 0 kN juures	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1			
Survepinge 3 kN juures	0,099465	0,626543	0,618684	0,583356	0,627301	0,65361	#DIV/0!	1		
Survepinge 6 kN juures	0,099465	0,626543	0,618684	0,583356	0,627301	0,65361	#DIV/0!	1	1	
Survepinge 9 kN juures	0,099465	0,626543	0,618684	0,583356	0,627301	0,65361	#DIV/0!	1	1	1

Lisa 2. Tugevussorteeritud konstruktsioonis kasutamata kuusepuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks

	Mass g	ρ kg/m ³	Resistograafi näit 0 kN juures	Resistograafi näit 2,5 kN juures	Resistograafi näit 5 kN juures	Resistograafi näit 7,5 kN juures	Survepinge 0 kN juures	Survepinge 2,5 kN juures	Survepinge 5 kN juures	Survepinge 7,5 kN juures
Mass g	1									
ρ kg/m ³	0,979437	1								
Resistograafi näit 0 kN juures	0,825339	0,829807	1							
Resistograafi näit 2,5 kN juures	0,83646	0,846366	0,923669	1						
Resistograafi näit 5 kN juures	0,818297	0,825354	0,890431	0,908477	1					
Resistograafi näit 7,5 kN juures	0,856732	0,854504	0,894444	0,882852	0,909461	1				
Survepinge 0 kN juures	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1			
Survepinge 2,5 kN juures	0,688339	0,752732	0,594593	0,553071	0,677545	0,731354	#DIV/0!	1		
Survepinge 5 kN juures	0,688339	0,752732	0,594593	0,553071	0,677545	0,731354	#DIV/0!	1	1	
Survepinge 7,5 kN juures	0,688339	0,752732	0,594593	0,553071	0,677545	0,731354	#DIV/0!	1	1	1

Lisa 3. Konstruksioonis kasutusel olnud kuusepuidust katsekehade korrelatsioonimaatriks

			Resistograafi näit 0 kN juures	Resistograafi näit 2,5 kN juures	Resistograafi näit 5 kN juures	Resistograafi näit 7,5 kN juures	Survepinge 0 kN juures	Survepinge 2,5 kN juures	Survepinge 5 kN juures	Survepinge 7,5 kN juures
Mass g	1									
ρ kg/m ³	0,880938	1								
Resistograafi näit 0 kN juures	0,470968	0,745719	1							
Resistograafi näit 2,5 kN juures	0,524097	0,750496	0,846854	1						
Resistograafi näit 5 kN juures	0,396659	0,695135	0,865341	0,939952	1					
Resistograafi näit 7,5 kN juures	0,40712	0,70689	0,840399	0,829635	0,89896	1				
Survepinge 0 kN juures	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	1			
Survepinge 2,5 kN juures	0,287261	0,667727	0,824273	0,799308	0,859563	0,871371	#DIV/0!	1		
Survepinge 5 kN juures	0,287267	0,667731	0,824271	0,799306	0,85956	0,871369	#DIV/0!	1	1	
Survepinge 7,5 kN juures	0,287273	0,667735	0,824269	0,799305	0,859557	0,871366	#DIV/0!	1	1	1

Lisa 4. Männipuidust katsekehade resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline regressioonanalüüs

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0,731385876
R Square	0,534925299
Adjusted R Square	0,515547186
Standard Error	9,269305251
Observations	26

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1	2371,7889	2371,79	27,60461	2,187E-05
Residual	24	2062,0805	85,92		
Total	25	4433,8694			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	106,985	59,425	1,80032	0,08439	-15,663	229,634	-15,663	229,634
0 kN	2,62609	0,49983	5,25401	0,00002	1,59450	3,65768	1,59450	3,65768

RESIDUAL OUTPUT

<i>Observation</i>	<i>Predicted ρ kg/m³</i>	<i>Residuals</i>	<i>Standard Residuals</i>
1	432,9002303	15,55505	1,71273
2	431,2003983	12,99793	1,43117
3	428,7516178	15,349307	1,69007
4	440,1577908	-6,524507	-0,7184
5	423,001277	7,6692082	0,84444
6	431,7062373	-4,822	-0,53094
7	424,4784321	0,1687904	0,01859
8	418,5609575	3,1804058	0,35019
9	431,0863169	-10,57726	-1,16464
10	426,0372515	-5,787614	-0,63726
11	406,9868687	13,095728	1,44194
12	415,3941928	3,4124951	0,37574
13	415,2637578	2,3903203	0,26319
14	424,3800117	-7,285119	-0,80215
15	409,8727206	6,4032345	0,70504
16	413,9892905	1,2061052	0,1328
17	411,9781641	3,1821675	0,35038
18	405,0716482	9,547184	1,05122
19	410,1266561	2,5255057	0,27808

Lisa 4 järg

<i>Observation</i>	<i>Predicted ρ kg/m³</i>	<i>Residuals</i>	<i>Standard Residuals</i>
20	418,8893401	-7,953579	-0,87575
21	415,4048542	-5,728498	-0,63075
22	411,2342757	-2,511669	-0,27655
23	411,6116165	-4,780583	-0,52638
24	423,8229241	-18,43167	-2,02947
25	408,8876942	-7,254948	-0,79882
26	404,8653758	-15,02599	-1,65448

Lisa 5. Tugevussorteeritud konstruktsioonis kasutamata kuusepuidust katsekehade resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline regressioonanalüüs

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0,829807
R Square	0,688579
Adjusted R Square	0,675039
Standard Error	11,37382
Observations	25

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1	6578,805	6578,805	50,85511551	2,90615E-07
Residual	23	2975,365	129,3637		
Total	24	9554,17			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	-137,372	76,2660	-1,80122	0,084795	-295,1398	20,396	-295,14	20,3966
Resisto 0	4,384931	0,61488	7,131277	2,906E-07	3,112939	5,6569	3,11294	5,65692

RESIDUAL OUTPUT

<i>Observation</i>	<i>Predicted p kg/m3</i>	<i>Residuals</i>	<i>Standard Residuals</i>
1	444,0101	9,068276	0,814442
2	414,1351	17,17573	1,542591
3	420,5485	15,28166	1,37248
4	394,3034	9,217192	0,827817
5	404,2476	-1,2408	-0,11144
6	426,0604	7,557292	0,678737
7	408,3668	-5,36582	-0,48192
8	419,1401	12,34294	1,108547
9	434,9504	0,662839	0,059531
10	427,2259	-24,2409	-2,17713
11	401,6197	-3,86778	-0,34737
12	396,4937	5,140583	0,461687
13	398,6436	0,130779	0,011746
14	391,4383	-6,68677	-0,60055
15	392,5429	-5,88648	-0,52868
16	382,7079	1,545741	0,138826
17	393,4725	13,80986	1,240294
18	393,205	11,94884	1,073152
19	422,1188	-3,32507	-0,29863

Lisa 5 järg

<i>Observation</i>	<i>Predicted ρ kg/m³</i>	<i>Residuals</i>	<i>Standard Residuals</i>
20	388,2027	-8,56528	-0,76927
21	420,164	-20,2235	-1,81632
22	394,9607	-5,71464	-0,51324
23	406,7413	-21,5567	-1,93606
24	395,8574	0,903142	0,081113
25	385,3551	1,888927	0,169649

Lisa 6. Konstruksioonis kasutusel olnud kuusepuidust katsekehade resistograafi mõõtetulemuste ja tiheduse vaheline regressioonanalüüs

SUMMARY OUTPUT

<i>Regression Statistics</i>	
Multiple R	0,745719
R Square	0,556096
Adjusted R Square	0,536796
Standard Error	6,604079
Observations	25

ANOVA

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Significance F</i>
Regression	1	1256,648	1256,648	28,813035	1,88205E-05
Residual	23	1003,119	43,61386		
Total	24	2259,767			

	<i>Coefficients</i>	<i>Standard Error</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>	<i>Lower 95,0%</i>	<i>Upper 95,0%</i>
Intercept	197,9748	35,40947	5,591013	1,09017E-05	124,7247356	271,2249	124,7247	271,2249
Resisto 0	1,512743	0,281819	5,367777	1,88205E-05	0,929755676	2,095731	0,929756	2,095731

RESIDUAL OUTPUT

<i>Observation</i>	<i>Predicted p kg/m3</i>	<i>Residuals</i>	<i>Standard Residuals</i>
1	386,5316	16,46202	2,546317
2	396,108	3,981242	0,615812
3	395,4636	3,743184	0,578989
4	397,7745	-0,02833	-0,00438
5	390,4061	7,319677	1,132195
6	391,5758	3,992062	0,617485
7	394,7418	0,263698	0,040788
8	396,2673	-2,21734	-0,34298
9	395,3264	-2,3267	-0,35989
10	389,6246	3,286401	0,508335
11	391,5762	1,028716	0,15912
12	395,0615	-2,95473	-0,45703
13	393,3546	-1,73552	-0,26845
14	379,3711	8,096238	1,252312
15	385,9839	-0,16906	-0,02615
16	385,5608	-0,15501	-0,02398
17	387,9819	-3,71864	-0,57519
18	377,8493	5,144075	0,795677
19	389,6194	-8,28312	-1,28122

Lisa 6 järg

<i>Observation</i>	<i>Predicted ρ kg/m³</i>	<i>Residuals</i>	<i>Standard Residuals</i>
20	386,6226	-6,05812	-0,93706
21	372,2935	5,797412	0,896734
22	375,1527	0,432596	0,066913
23	383,3122	-9,66346	-1,49473
24	378,1256	-8,55808	-1,32375
25	382,1331	-13,6792	-2,11588

Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Joosep Tohvri,
(sünnipäev 16.04.1993)

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud lõputöö „Vastupanu mikropuurimise seos okaspuidu tiheduse ja ristikiudu survepingega“, mille juhendaja on Marko Teder,
 - 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemisekskuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor

allkiri

Tartu, 22.05.2017

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)